

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Szostok**  
Studijní program: N3923 Materiálové inženýrství  
Studijní obor: 3911T031 Diagnostika a design materiálů  
Téma: **Zvyšování integrity ocelí pro výrobu forem**  
**Increasing of Steel Integrity for Production of Moulds**

Zásady pro vypracování:

1. Druhy a vlastnosti ocelí pro výrobu forem - vlivy prostředí a požadavky kladené na oceli pro formy
2. Zvyšování vlastností ocelí tepelným zpracováním - přeměny oceli při tepelném zpracování
3. Metody zkoušení kvality ocelí
4. Experimentální práce - určení chemického složení vzorků, zjištění mechanických vlastností materiálu
5. Diskuze dosažených výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Machek V., Sodomka J.: Nauka o materiálu: kovy a kovové materiály 2. Praha: ČVUT, 2002. 213 s.
- [2] Ptáček L. a kol.: Nauka o materiálu II. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- [3] Fremunt, P., Krejčík, J., Podrábský, T. Nástrojové oceli Brno: Dům techniky, 1994. 229 s.
- [4] Bhadeshia, H.K.D.H., Honeycombe, R.W.K. Steels: microstructure and properties Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 344s. ISBN 0-7506-8084-9
- [5] Autorský kolektiv Poldi Kladno. Nástrojové oceli a jejich použití I. Díl. Praha SNTL, 1986, 412 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

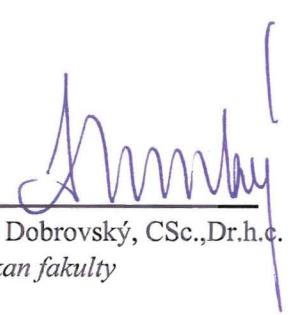
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Stanislav Lasek, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2009

Datum odevzdání: 05.05.2010

  
prof. Ing. Zdeněk Jonšta, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.  
děkan fakulty

# Zásady pro vypracování diplomové práce

## I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

## II.

Uspořádání diplomové práce:

- |  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list + zásady pro vypracování DP  | 5. Textová část DP           |
| 2. Prohlášení + místopřísežné prohlášení     | 6. Seznam použité literatury |
| 3. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 7. Přílohy                   |
| 4. Obsah DP                                  |                              |

ad 1) Titulním listem je originál zadání DP, který student obdrží na své oborové katedře. Za titulním listem následují tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“.

ad 2) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. *V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.*

ad 3) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 4) Obsah DP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 5)

Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 7).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U

vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 6) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

ad 7) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

### III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*  
*Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství*  
*Katedra . . . . .*

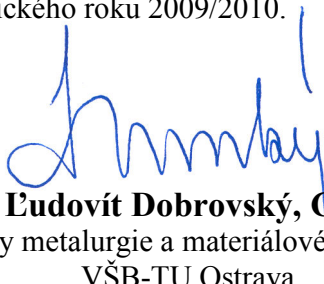
uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

### IV.

Diplomová práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2009/2010.



Ostrava 30. 11. 2009

**Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.**  
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství  
VŠB-TU Ostrava

# PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

**Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval(a) samostatně.**

V Ostravě 12. 5. 2010 .....

Martin Prostěj .....  
podpis (jméno a příjmení studenta)

## **Poděkování**

V úvodu této práce bych chtěl poděkovat Doc. Ing. Stanislavu Laskovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, důkladnou kontrolu zpracování odborného textu, poskytnutí podkladů a cenných rad při jejím vypracování. Dále bych chtěl poděkovat prof. Ing. Miroslavovi Tvrdému, DrSc. za zprostředkování a výpomoc při analýze vzorků experimentální části.

## **ABSTRAKT**

Cílem této diplomové práce je řešení problematiky zvýšení integrity forem, které jsou určeny pro výrobu dílů z pryže. V práci je provedena expertíza vzorků s následným návrhem na zvýšení integrity materiálu formy. Formy jsou vyrobeny z odlišných typů ocelí, a tudíž mají i různé provozní parametry. Navržený technologický postup musí zlepšit provozní parametry a životnost forem.

**Klíčová slova:** Oceli na formy, vlastnosti oceli, tepelné zpracování, fázové transformace, nástrojové oceli

## **ABSTRACT**

The aim of this diploma work is dealing with increasing the integrity of molds for production of rubber parts. At work is done the expertise of the samples with resulting suggestion to increase integrity of mould material. Forms are made from different of type steels, and hence have also various operation parameters. Designed technologic processes have to improve operation parameters and life moulds.

**Keywords:** Steels for moulds, properties of steel, heat-treating treatment, phase transformation, tools steels

# OBSAH

1	ÚVOD.....	4
2	DRUHY A VLASTNOSTI OCELÍ NA FORMY.....	5
2.1	Rozdělení ocelí pro výrobu forem.....	5
2.2	Požadavky na oceli pro výrobu forem.....	6
2.2.1	Malé objemové změny po zušlechťení.....	6
2.2.2	Vrubová houževnatost.....	6
2.2.3	Odolnost proti korozi.....	7
2.2.4	Leštitelnost.....	7
2.2.5	Abrazivní opotřebení.....	7
2.2.6	Odolnost proti opotřebení za normálních i zvýšených teplot.....	7
3	FÁZOVÉ PŘEMĚNY OCELI.....	9
3.1	Vznik a přeměna austenitu.....	9
3.1.1	Proeutektoidní přeměny.....	10
3.1.2	Perlitická přeměna.....	11
3.1.3	Bainitická přeměna po kalení.....	12
3.1.4	Martenzitická přeměna po kalení.....	14
3.2	Transformační diagramy ocelí.....	16
3.2.1	Diagram anizotermického rozpadu austenitu ARA.....	17
3.3	Diagramy tepelného zpracování oceli.....	18
4	ZKUŠEBNÍ METODY VLASTNOSTÍ OCELI.....	21
4.1	Zkouška rázem v ohybu.....	21
4.2	Zkouška prokalitelnosti.....	23
5	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	25
5.1	Zkoumání chemických a strukturních vlastností vzorků.....	28

5.1.1	Metalografická analýza.....	28
5.1.2	Mikroskopická analýza.....	29
5.2	Zkoušení mechanických vlastností vzorků oceli .....	30
5.2.1	Vickersova zkouška .....	30
5.2.2	Charpyho zkouška .....	30
5.3	Vyhodnocení experimentálních výsledků.....	31
5.3.1	Vyhodnocení chemické analýzy .....	31
5.3.2	Mikroskopická analýza.....	33
5.3.3	Vyhodnocení tvrdosti vzorků .....	37
5.3.4	Vyhodnocení vrubové houževnatosti vzorku .....	38
5.3.5	Makroskopická analýza lomu .....	39
6	DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....	43
7	ZÁVĚR.....	47
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	49



# 1 ÚVOD

S výrobky, které jsou vyrobené lisovací technologií s použitím formy, se setkáváme téměř všude (v zaměstnání, při sportu, v domácnosti atd..). Finální lisovaný výrobek má mnohdy dosti složitý tvar a často jsou na něj kladeny vysoké nároky. Často je zapotřebí, aby výrobky byly lehké, odolávaly mechanickému poškození, měly vysokou plasticitu, byly pevné a držely svůj tvar. Aby bylo možno vyrobit kvalitní lisovaný výrobek, je zapotřebí mít kvalitní výrobní nástroje a zvolit správnou technologii výroby.

Formy jsou důležitou součástí při výrobě výrobků metodou lisování. Protože je forma často složitý, vysoce namáhávaný a drahý nástroj, je potřeba se zaměřit na vhodný výběr materiálu už při prvotním návrhu. Při výběru správného druhu oceli je potřeba posoudit druh zpracovávané hmoty a její vlastnosti, velikost vyráběných předmětů, jejich tvar, množství a způsob výroby, náklady spojené s její výrobou a mnoho dalších aspektů.

Je mnoho druhů oceli, které bychom mohli použít pro výrobu forem. Tyto oceli však nemusí plnit požadované nároky, jež jsou kladeny na materiál nástroje. Proto pro výrobu forem nejčastěji volíme nástrojové oceli, které vynikají svými jedinečnými vlastnostmi.

Nástrojové oceli patří do skupiny materiálů, na které jsou často kladeny náročné provozní podmínky. Většina těchto ocelí musí vzdorovat silám mechanického namáhání, jiné odolávat agresivnímu prostředí, vysokým teplotám nebo kombinacím těchto vlivů. Tyto důvody jsou jedny z mála, proč jsou nástrojové oceli vhodné i pro výrobu forem.

V této práci budou vysvětleny požadavky, které jsou kladeny na materiál pro výrobu forem, které slouží při výrobě elastomerů. Dále budou charakterizovány struktury ocelí, které vznikají tepelným zpracováním a vysvětleny základy zkoušení mechanických vlastností materiálů. V experimentální části budou vylíčeny metody, pomocí kterých se zjišťují mikrostruktury materiálu, a mechanické vlastnosti. Následně budou tyto metody aplikovány na neznámých vzorcích oceli, a bude proveden návrh pro zvýšení mechanických vlastností těchto ocelí.

Cílem této práce je navržení správného technologického postupu zvýšení integrity neznámého vzorku oceli. Vzorek bude odebrán z formy, která slouží při produkci výrobků z pryže. Po splnění experimentů a zkoušek bude navržen technologický postup tak, aby materiál této formy překračoval minimální stanovenou dobu životnosti a měl co nejméně poruch.

## 2 DRUHY A VLASTNOSTI OCELÍ NA FORMY

Návrh správného typu oceli na formy je závislý na vhodné kombinaci fyzikálních a metalurgických vlastností, které jsou požadovány při zhotovování výrobku. Každá ocel má svou zaručenou vlastnost, kterou vyniká. Můžeme mít dvě stejně značené oceli, které jsou shodné svým chemickým složením, ale jejich použitelnost v provozu bude odlišná [21]. Je to dáno tím, že jedna z oceli může být jinak tepelně zpracována a tím se změní její struktura a vlastnosti. Vlastnosti oceli udávají kvalitu a způsob použitelnosti v průmyslu. Není možné vyrobit ocel s užitnými vlastnostmi pro všechna odvětví.

### 2.1 Rozdělení ocelí pro výrobu forem

Je mnoho způsobů jak se nástrojové oceli dají rozdělit. Některé normy dělí oceli na nástroje podle způsobu kalení jiné podle druhu použití nebo také podle chemického složení. V normách je nejčastěji rozdělení nástrojových ocelí uváděno podle chemického složení.

Pro praktické použití je však nejvhodnější nástrojové oceli dělit podle způsobu použití, jak to uvádí norma ČSN 42 0075. Tato norma rozděluje nástrojové oceli do osmi hlavních skupin, které jsou označeny písmeny NA až NH. Hlavní skupiny se dále dělí na podskupiny. V této kapitole se zaměříme na skupinu ocelí na výrobu forem (s označením ND). Podle použití jsou zde oceli rozděleny do pěti skupin:

ND 1 - oceli na formy pro tlakové lití. Tyto oceli se používají pro výrobu forem, do kterých se pod tlakem vstříkuje roztavený kov [12]. Zde vyhovují oceli odolné proti tepelné únavě, tepelným rázům, strukturně a rozměrově stabilní.

ND 2 – oceli na formy pro lisování kovových a nekovových prášků [12]. Zde patří oceli, které musí mít vysokou odolnost proti opotřebení.

ND 3 – oceli na formy pro zpracování plastických hmot. Oceli v této kategorii musí hlavně odolávat abrazivnímu opotřebení a je zde kladen důraz na dobrou leštitelnost [3].

ND 4 – oceli na formy pro tváření pryže [4]. Tyto nástroje jsou méně namáhané, takže si obvykle vystačí s nelegovanými nebo nízkolegovanými oceli.

ND 5 – oceli na formy pro výrobu skla, porcelánu a keramického materiálu. Porcelán působí při lisování silně abrazivně, takže oceli musí mít vysokou odolnost proti tomuto opotřebení. U

forem na lisování skla se vyžaduje odolnost oceli proti opotřebení za zvýšených teplot, tepelné únavě a odolnost proti okujení [12].

Jelikož oceli pro výrobu forem musí splňovat spoustu dalších nároků, které jsou pro každý způsob aplikace rozdílné, třídí se každá skupina oceli na další tři podskupiny. Dělí se tedy na nelegované oceli, nízko a středně legované oceli a na vysokolegované oceli [14]. V těchto podskupinách jsou oceli značeny podle normy ČSN, která je dále rozčleňuje dle chemického složení [21].

## **2.2 Požadavky na oceli pro výrobu forem**

Vlastnosti ocelí na formy jsou jedny z nejdůležitějších faktorů plynulého a bezporuchového provozu. Každá ocel pro výrobu formy musí splňovat nároky, jako jsou: pevnost a tvrdost, houževnatost, prokalitelnost, odolnost proti popouštění, rozměrová stálost [3]. Tyto základní vlastnosti nástrojových ocelí a oceli na formy již byly popsány v bakalářské práci Diagnostika nástrojových ocelí [27]. Jelikož mají formy často komplikovaný tvar, a jsou rozdílným způsobem namáhány než oceli na nástroje, vylíčíme si základní požadavky, které by měl materiál formy splňovat.

### **2.2.1 Malé objemové změny po zušlechtní**

Při tepelném zpracování dochází k rozměrovým a tvarovým změnám, které se projevují změnou tolerancí a odchylek [21]. V konečné fázi může dojít až k trvalé deformaci a znehodnocení výrobku. Je to způsobeno změnami rozměrů výrobku v důsledku změny teplot při tepelném zpracování, nestejnou teplotou v průřezu tepelně zpracovávaného výrobku a strukturními přeměnami [12]. Při větších změnách se zvyšují náklady na opracování konečného tvaru formy. Malé objemové změny rozměrů jsou charakteristické pro oceli kalené na vzduchu.

### **2.2.2 Vrubová houževnatost**

Vrubová houževnatost oceli závisí na podobě matrice, množství, velikosti a morfologii karbidů. Vyšší plastické vlastnosti mají oceli jemnozrnné. Karbidy mají být jemné, rovnoměrně rozložené v matici a s minimálním vnitřním pnutím [12]. U ocelí do 60HRC lze měřit houževnatost rázovou zkouškou v ohybu na vzorcích s vrubem nebo bez vrubu.

### **2.2.3 Odolnost proti korozi**

Koroze se definuje jako samovolně probíhající nevratný proces postupného rozrušování a znehodnocování materiálu následkem chemické nebo elektrochemické reakce s okolním prostředím [3]. Odolnost proti tomuto působení je možno zvýšit legováním oceli vhodnými přísadami o vyšší afinitě ke kyslíku než má železo nebo vytvořením povlaku na konečném tvaru výrobku. Mezi běžně dostupné přísady se nejvíce osvědčil chrom, hliník [4].

### **2.2.4 Leštitelnost**

Protože se požaduje u materiálů na formy hladký povrch, musí být dobře lešitelné, což nepříznivě ovlivňují shluky velkých, tvrdých karbidů a zbytkový austenit. Při vysoké tvrdosti matrice a karbidů, resp. při nevhodném broušení, se zvyšuje teplota povrchu při broušení tak vysoko, že se v malé povrchové vrstvičce vytvoří ostrůvky austenitu, který transformuje při následujícím ochlazení na martenzit nebo zůstane v matici jako zbytkový austenit [12]. Objemové změny při martenzitické transformaci vyvolávají pnutí => vznik prasklinek.

### **2.2.5 Abrazivní opotřebení**

Působí zejména při zpracování materiálů za tepla, nebo heterogenních materiálů, a to především prostřednictvím oxidů ze zpracovávaného materiálu, který v důsledku tření vydírá formu [14]. Částice zpracovávaného materiálu jsou tedy zatlačovány do pracovního povrchu formy, přičemž mohou být nesený taveninou nebo plynem. Zpracovávaný materiál nemusí být tvrdý, ale může agresivně reagovat na materiál formy [4].

### **2.2.6 Odolnost proti opotřebení za normálních i zvýšených teplot**

Při vstřikování plastů nebo pryže může docházet k opotřebení mezi vstřikovaným materiálem a plochou formy. Hlavní cestou ke snížení opotřebení je použití materiálu, jejichž tvrdost je srovnatelná s tvrdostí působících částic [21]. Odolnost se posuzuje podle poklesu tvrdosti při dlouhodobém ohřevu materiálu na vyšší teplotu. U nelegovaných ocelí klesá tvrdost od teploty 200°C. Zvýšení odolnosti oceli proti opotřebení se zabezpečuje legováním karbidotvornými prvky (Cr, W, V, Mo, Ti) a přísadou kobaltu [3].

Výroba formy není často jednoduchá a levná záležitost. Pro optimální výběr nástrojové oceli je nezbytné znát druh hmoty, která se bude na formě zpracovávat, její vlastnosti, velikost a tvar vyráběných předmětů, množství a způsob výroby a další technologické aspekty [12]. Krátká životnost formy nebo dlouhé prostoje přináší více nákladů, vyšší režie na opravu. Špatně navržený materiál vede nejen k nárůstu nákladů na opravu, ale může také vést ke kritickému porušení formy a následně ke katastrofickým škodám na zdraví i majetku.

### 3 FÁZOVÉ PŘEMĚNY OCELI

Cílem tepelného zpracování je dosažení požadovaných vlastností ocelových materiálů cílevědomým řízením průběhu fázových a strukturních přeměn. Strukturní a fázové přeměny vznikají při postupné změně teplot, které jsou rozděleny na tři části: ohřev na předepsanou teplotu, výdrž na této teplotě a ochlazování. Pomocí přeměn můžeme docílit různých struktur, které budou závislé na druhu tepelného zpracování. U ocelí na výrobu forem a nástrojů se nejčastěji využívá proces žíhání, kalení a popouštění. Všechny tyto procesy byly popsány v bakalářské práci Diagnostika nástrojových ocelí [27]. V této práci budou popsány strukturní přeměny, které se nejčastěji používají u nástrojových ocelí na výrobu forem produkující výrobky z elastomeru.

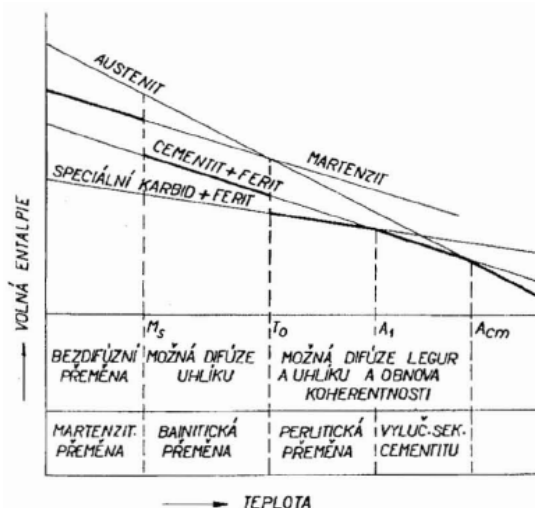
#### 3.1 Vznik a přeměna austenitu

Základním procesem při tepelném zpracování ocelí je austenitizace. Jde o pochod, kdy se ocel ohřívá na teploty vyšší než překrystalizační s následnou výdrží na této teplotě. Během setrvání na teplotě austenitizace musí proběhnout změna struktury z heterogenní na homogenní (přeměna feriticko-cementické struktury na strukturu austenitickou) [18]. V průběhu tohoto procesu probíhá zpravidla růst austenitického zrna, což má vliv na mechanické a technologické vlastnosti oceli.

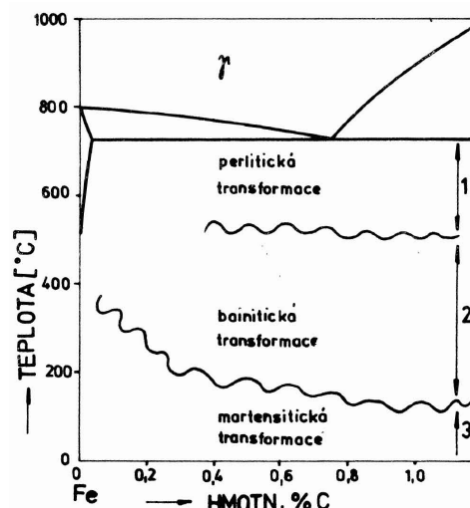
Velikost zrna o určitém složení bude také záviset na stavu výchozí struktury oceli, na podmínkách její rekystalizace a na době a teplotě austenitizace. Tyto podmínky se týkají sekundárního austenitického zrna tj. zrna, které vzniklo při jakékoliv i opakované překrystalizaci feriticko-karbidické struktury. Primární austenitické zrno je zrno, které vzniklo z taveniny nebo tuhého roztoku  $\delta$  při tuhnutí oceli a neprodělalo žádnou fázovou přeměnu [26]. Austenitické zrno vzniklé bezprostředně po překrystalizaci, se zvětšuje (roste), v závislosti na teplotě a čase. Roste-li zrno rovnoměrně již při malém překročení kritické teploty, pak se ocel označuje jako dědičně hrubozrnná. U oceli dědičně jemnozrnných zůstává velikost austenitického zrna až do kritické teploty hrubnutí bez podstatné změny a teprve po jejím překročení zrno roste, často až velmi rychle [24]. Velikost zrna určujeme pomocí normy ČSN EN ISO 643 (420462) - Ocel - Mikrografické stanovení velikosti zrn [10].

Výše teploty přeměny má rozhodující význam pro rozsah difuze. Poměr difuze uhlíku  $D_C$  k poměru difuze železa  $D_{Fe}$  nabývá hodnot  $10^2$  až  $10^7$  [26]. Se snižující se teplotou

klesají i hodnoty  $D_C$  a  $D_{Fe}$ , přičemž pokles hodnoty  $D_{Fe}$  je rychlejší. Z obr. 1 je vidět, že při větším podchlazení vznikají z kinetických důvodů (tj. nedostatečně účinné difuze) fáze a struktury termodynamicky méně stabilní, tedy s vyšší hodnotou volné entalpie, než by odpovídalo feriticko-karbidické směsi [18].



Obr. 1: Schéma termodynamických podmínek přeměn austenitu nadeutektoidní oceli [26].



Obr. 2: Teplotní a koncentrační oblasti, ve kterém probíhají základní transformace přechlazeného austenitu [26].

Oblasti výskytu hlavních typů přeměn přechlazeného austenitu jsou schematicky znázorněny na obr. 2 v závislosti na teplotách. V rozmezí teplot 1 probíhá proeutektoidní přeměna vzhledem k jedné z perlitických reakcí. Při této reakci bude vznikat u ocelí podeutektoidních proeutektoidní ferit a u ocelí nadeutektoidních vznikne proeutektoidní cementit [24]. Výsledkem těchto proeutektoidních reakcí je perlitická struktura. Ve střední teplotní oblasti 2 probíhá bainitická přeměna přechlazeného austenitu. Martenzitická přeměna proběhne při nejnižší teplotní oblasti 3. Vznik a průběh těchto přeměn je podrobně popsán v následujících kapitolách.

### 3.1.1 Proeutektoidní přeměny

Proeutektoidní přeměna probíhá u ocelí podeutektoidních i nadeutektoidních při pomalém ochlazování austenitu. Výjimku tvoří oceli s eutektoidní koncentrací uhlíku, kde se austenit přeměňuje až po dosažení teploty  $A_{r1}$ , kdy se všechen austenit promění v perlit.

Při ochlazování podeutektoidních ocelí začne přeměna homogenního austenitu až při dosažení určité teploty. Při této teplotě se začnou z taveniny vylučovat krystaly austenitu a feritu a to až do teploty  $A_{r1}$ , kdy se zbylý austenit přetransformuje v perlit (ferit+cementit) [24].

Při ochlazování nadeutektoidních ocelí začne přeměna homogenního austenitu až při dosažení určité teploty. Při této teplotě se začnou z taveniny vylučovat krystaly austenitu a cementitu a to až do teploty  $A_{r1}$ , kdy se zbylý austenit přetransformuje v perlit (ferit+cementit) [18].

V případě velmi pomalého ochlazování austenitu v určité teplotě se začne vylučovat proeutektoidní fáze ve tvaru síťoví po hranicích austenitických zrn, jehož tloušťka se zmenšuje s klesající teplotou přeměny [24]. Pokud bude fáze obohacena uhlíkem, následně se rozpadne na perlit.

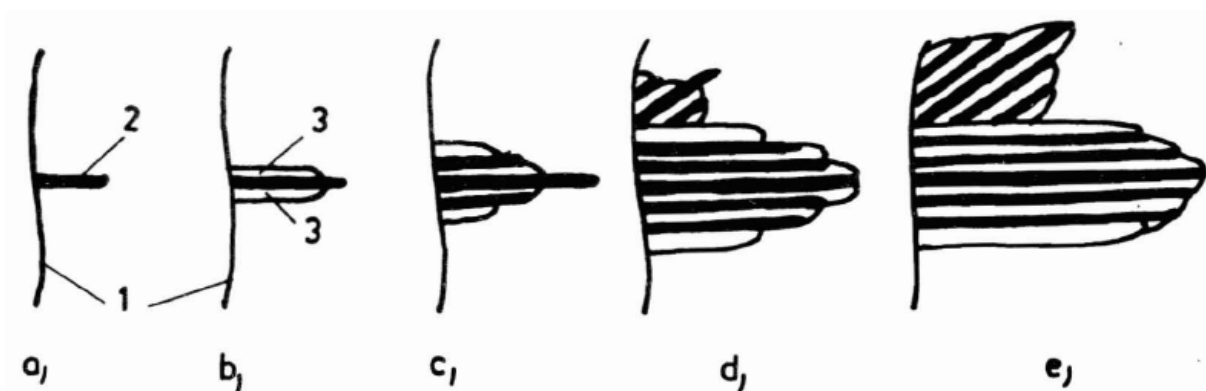
Jestliže provedeme rychlé ochlazování, nebo budou-li austenitická zrna hrubá, vznikne Widmannstättenova struktura tvořená deskami nebo jehlicemi feritu a perlitem. Tato struktura se nejčastěji vyskytuje u odlitků po odlití a v tepelně ovlivněné oblasti u svarových spojů.

### 3.1.2 Perlitická přeměna

Perlitická přeměna začíná heterogenní nukleací, která nukleuje na hranicích austenitických zrn nebo na fázovém rozhraní austenit - minoritní fáze (nerozpuštěné karbidy) [5]. Hlavním výnosem fází přeměny může být jak ferit tak cementit. Vznik feritického nebo cementického zárodku je dáno druhem zpracovávané oceli.

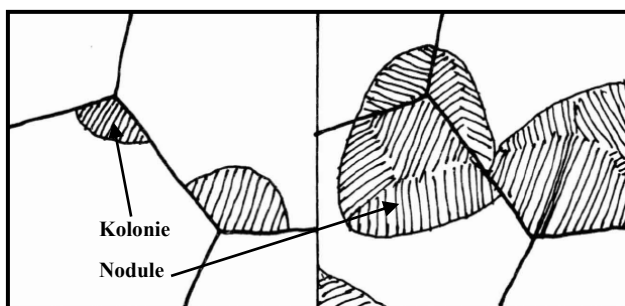
Při pomalém ochlazování nebo při vyšší teplotě izotermické výdrži se na hranicích austenitického zrna vytvoří zárodek cementitu obr. 3a, který roste ve formě lamely do zrna [18]. Současně se okolí částice ochudí o uhlík a na hranicích austenitického zrna těsně vedle lamely cementitu vzniknou dva zárodky feritu, které rostou rovnoběžně podél existující lamely cementitu obr. 3b [26]. Tato reakce probíhá tak dlouho, až vznikne skupina rovnoběžných lamel feritu a cementitu (1 lamela perlitu a 1 lamela cementitu je 1 lamela perlitu), které se říká kolonie perlitu obr. 3c [18]. Vznikne-li zárodek perlitu odlišně orientovaný od dosavadních rostoucích perlitických lamel, roste pak nová perlitická kolonie obr. 3d, e. Skupině perlitických kolonií se říká perlitická nodule obr. 4.



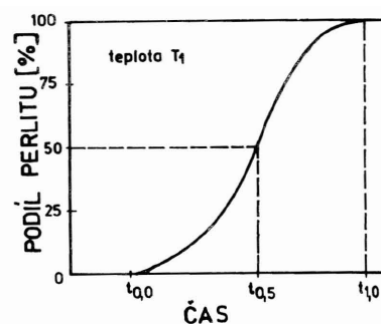


Obr. 3: Vznik a růst perlitických kolonií. 1 - hranice austenitického zrna, 2 - deska cementitu, 3 - deska feritu [26].

Perlitická transformace se vyznačuje tzv. izotermou perlitické přeměny (inkubační doba), která vyjadřuje závislost podílu vzniklé perlitické struktury na čase při konstantní teplotě reakce obr. 5 [26]. Inkubační perioda není údobí, v němž by se v soustavě nic nedělo, ale je to doba nutná pro vznik zárodku kritické velikosti.



Obr. 4: Vznik perlitických kolonií a nodulí [18].



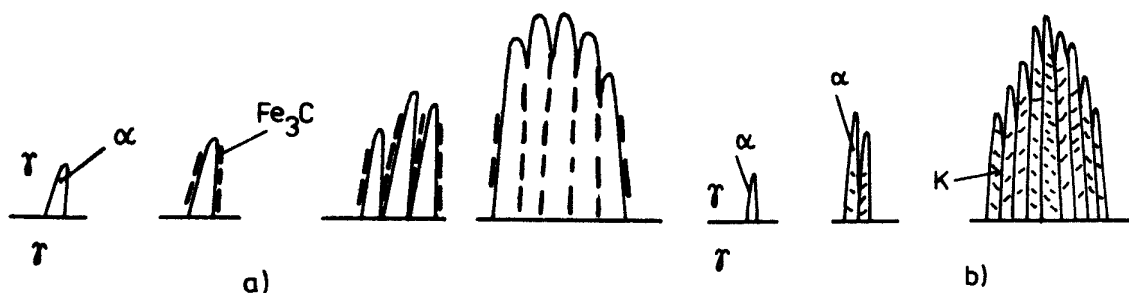
Obr. 5: Izoterma perlitické přeměny [26].

Tloušťka lamel je závislá na velikosti přechlazení. S rostoucím přechlazením se tloušťka lamel zmenšuje. S klesající teplotou perlitické přeměny vzrůstají mechanické vlastnosti jako je mez kluzu, pevnost a tvrdost oceli.

### 3.1.3 Bainitická přeměna po kalení

Při středně rychlém ochlazování austenitu a v určité teplotní oblasti (cca 550°C až  $M_s$ ) vznikají dvě fáze, kdy každá z nich se tvoří odlišným mechanismem. Smykovým mechanismem vzniká ferit a difuzním mechanismem cementit [5]. Výsledným produktem je směs feritu a cementitu, který se nazývá bainit.

Při vznikajícím bainitu je přebytečný uhlík vytlačován rostoucími deskami feritu do austenitu, a pokud se v austenitu překročí rovnovážná koncentrace uhlíku, precipituje ve formě karbidů [6]. Za určitých podmínek se reakce můžou vylučovat i uvnitř feritických desek. Mechanismus tvorby bainitu i jeho morfologie se mění s reakční teplotou, proto obvykle rozlišujeme horní a spodní bainit obr. 6.

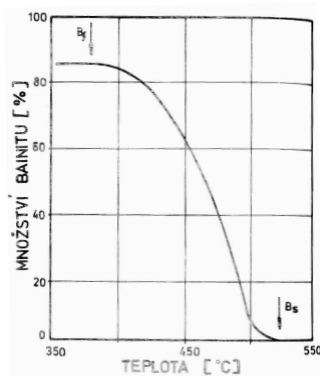


Obr. 6: Schéma tvorby bainitu ve středně uhlíkové oceli: a) vznik horního bainitu, b) vznik dolního bainitu;  $\alpha$  – bainitický ferit;  $\gamma$  - austenit; K – karbid  $\epsilon$ , popř. cementit [24].

Horní bainit: tvoří se v podchlazeném austenitu při vyšších reakčních teplotách (u středně uhlíkových ocelí při cca 500°C), je charakteristický vyloučenými karbidy na hranicích feritických desek obr. 6a [24], i když uvnitř desek jsou také vyloučeny jemnější karbidy.

Dolní bainit: vzniká spíše smykovým mechanismem při nižších teplotách obr. 6b. Desky se stejným obsahem uhlíku jako má austenit, ze kterého vznikají, jsou přesyceny uhlíkem a proto v nich precipitují karbidy [18]. Dolní bainit je podobný mikrostruktuře vysoce popuštěného martenzitu.

Vznik bainitické transformace je spojen s existencí inkubační periody izotermické kinetické křivky, která se podobá perlitické kinetické křivce obr. 7. Na rozdíl od perlitické přeměny nekončí tato křivka u 100 % bainitu, ale ve struktuře se vždy objevuje určitý podíl austenitu. Bainitické transformaci je podobná martenzitická transformace a proto i zde máme teploty  $B_s$  - teplota počátku bainitické přeměny,  $B_f$  - teplota konce martenzitické přeměny, jenž závisí na obsahu uhlíku v oceli [26].



Obr. 7: Bainitická křivka [26]

S transformační teplotou se mění vlastnosti jednotlivých bainitů. Klesá-li transformační teplota tvrdost i pevnost se snižuje. Vysoká pevnost bainitu spočívá hlavně v disperzním zpevnění vyprecipitovanými karbidy [18]. Bainitická struktura se liší od perlitické struktury tím, že je stejnorodější a od martenzitické struktury se liší svou dobrou houževnatostí i když má nižší pevnost.

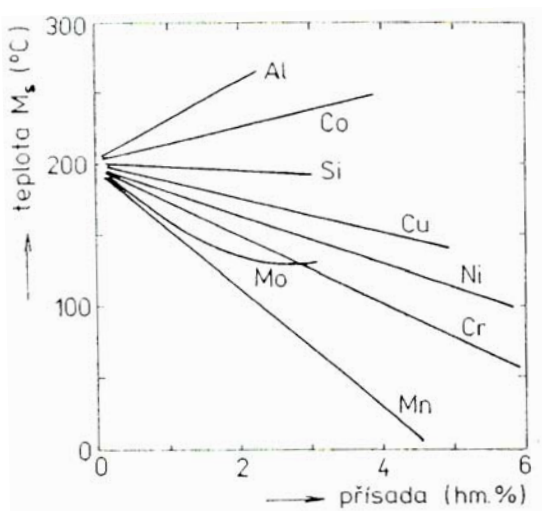
### 3.1.4 Martenzitická přeměna po kalení

Ochlazujeme-li austenit nadkritickou rychlostí a v určité teplotní oblasti (cca 400°C a méně) dochází k vytvoření struktury zvané martenzit tj. nerovnovážený přesycený tuhý roztok uhlíku v železe alfa. Mikrostruktura martenzitu se nejčastěji vyskytuje v podobě jehlicových desek s vysokou tvrdostí a křehkostí matrice [5].

Martenzitická přeměna  $M_s$  probíhá v určitém rozmezí teplot, jež závisí na obsahu uhlíku, těsně pod koncem křivky bainitické přeměny  $B_s$ . Při dané teplotě jsou zcela potlačeny difúzní jevy a probíhá pouze přeměna mřížky gama na mřížku alfa. V důsledku této transformace zůstane uhlík uzavřen v mřížce železa alfa. Jelikož za jiných přeměn železo alfa v sobě téměř nerozpouští uhlík, vyvolává nutně násilně uzavřený uhlík v mřížce vysoké pnutí [26], popř. její deformaci, což se navenek projevuje vysokou tvrdostí a křehkostí matrice.

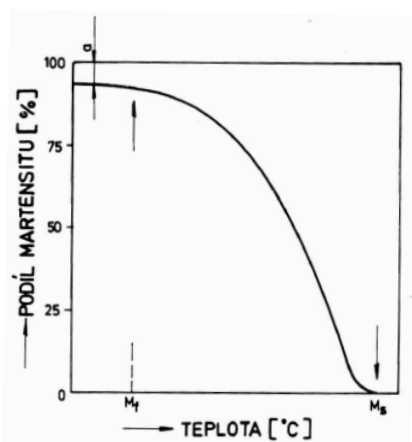
Přeměna mřížky kubické plošně centrované, kterou má austenit, na mřížku martenzitu, jež je kubická prostorově centrovaná, se uskutečňuje pohybem atomů železa na vzdálenosti menší, než je parametr mřížky [24]. Jde tedy o bezdifúzní přeměnu. Atomy železa se tak při martenzitické transformaci dostávají do nových poloh smykem (smykovým mechanismem).

Transformace je dále charakteristická tím, že teploty počátku  $M_s$  a konce  $M_f$  martenzitické přeměny nezávisí na teplotě přeměny, ale i na obsahu uhlíku a legur v oceli obr. 8 [26].



Obr. 8: Vliv legujících prvků na teplotu  $M_s$  oceli s 1 % uhlíku [26].

Martenzitická přeměna není tedy závislá na čase, ale jen na teplotě vzniku. Jestliže austenit dosáhne teploty počátku martenzitické transformace  $M_s$ , začne se ihned tvořit martenzit, bez inkubační periody [24]. Na martenzitické kinetické křivce obr. 9 však vidíme, že transformace se neuskuteční v celém objemu austenitu, ale vždy zůstane určitý podíl austenitu [18]. Je to dáno tím, že každému intervalu teplot odpovídá určitý podíl martenzitu. Po ukončení martenzitické transformace zůstává zbytkový austenit, jehož množství roste s rostoucím obsahem uhlíku v oceli.



Obr. 9: Martenzitická křivka; a – podíl zbytkového austenitu [18].

Mikrostruktura martenzitické zakalené oceli má deskový jehlicovitý tvar. První vzniklé desky rozdělí austenitické zrna na několik částí a další rostoucí desky nemohou původní desky překonat [26]; proto jsou jemnější. Mezi těmito deskami, vlivem vzájemného narážení, vzrůstá napětí, dochází k plastické deformaci okolního austenitu, roste hustota dislokací a tím se poruší koherence hranice austenit-martenzit, růst desek se zastaví. Desky svůj růst končí v okamžiku, kdy narazí na překážku [18]. Můžou jimi být hranice austenitických zrn nebo jiné vzniklé desky martenzitu. Rychlost růstu desek martenzitu dosahuje hodnot rychlosti zvuku v kovech.

Celou kapitolu můžeme shrnout následovně. Při ochlazování austenitu můžou proběhnout, v závislosti na rychlosti ochlazování, nebo teplotě izotermické výdrže, tři druhy přeměn. Perlitická přeměna vzniká difúzním mechanismem z austenitu při pomalém ochlazování. Výsledkem je perlit tj. směs feritu a cementitu nebo cementitu a perlitu. Bainitická přeměna vzniká při středně rychlém ochlazování. Při této přeměně vzniká z austenitu bainit, tj. opět směs feritu a cementitu. Ferit vzniká smykovým mechanismem a cementit vzniká difúzním mechanismem. Martenzitická přeměna vzniká při rychlém (nadkritickém) ochlazování. Vzniká tak martenzit, tedy jedna fáze, a to výhradně smykovým mechanismem. Všechny tři druhy přeměn jsou pro izotermické i pro anizotermické podmínky.

### 3.2 Transformační diagramy ocelí

Během tepelného zpracování oceli dochází k přeměně přechlazeného austenitu určitým průběhem ochlazení. Abychom zvolili správný technologický postup pro dané ochlazení, potřebujeme stanovit teplotu a rychlost ochlazování materiálu. K tomu nám poslouží transformační diagramy, které nám názorně zobrazují časový průběh přeměn podchlazeného austenitu určitého chemického složení. V praxi využíváme dva druhy diagramů. Diagram izotermického rozpadu austenitu (IRA), který udává dobu přeměn austenitu za izotermických podmínek a diagram anizotermického rozpadu austenitu (ARA), jenž nám znázorňuje dobu přeměn austenitu při různých rychlostech ochlazování [24].

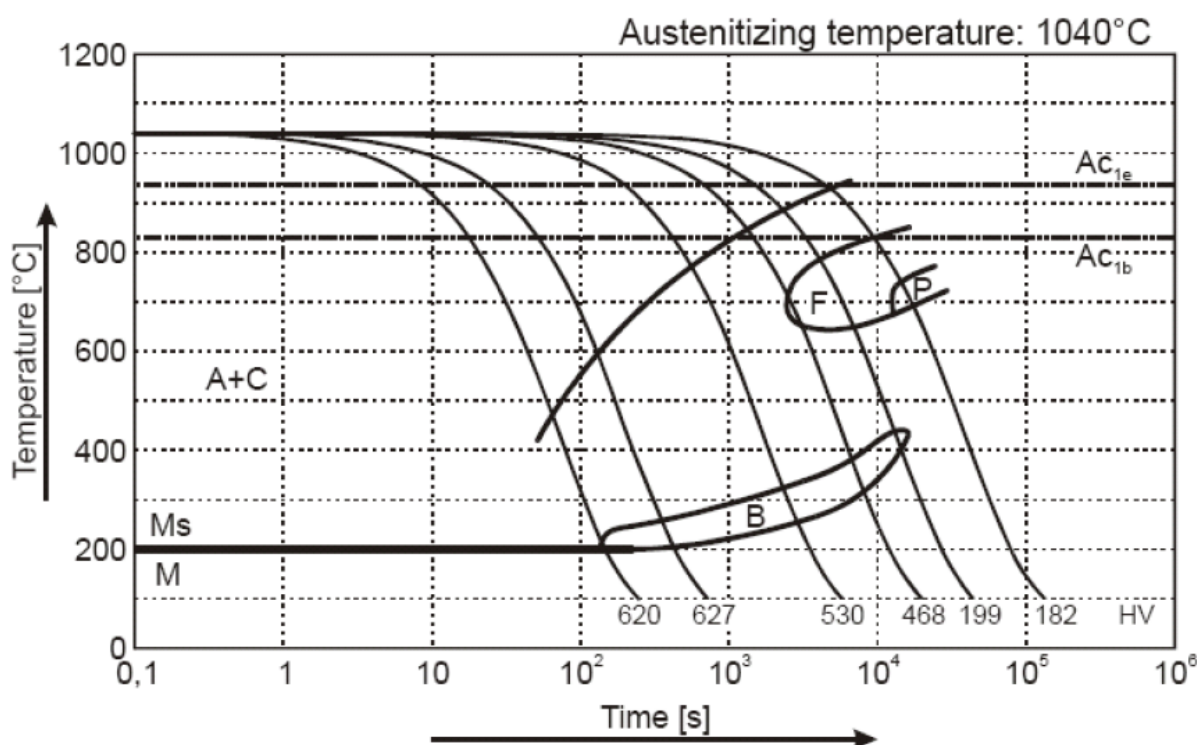
Diagramy kreslíme v souřadnicích logaritmu času a teploty. Křivky, které se zakreslují do diagramu, obsahují údaje o kritických teplotách  $A_1$ ,  $A_3$ ,  $A_{cm}$ , a hranice perlitické ( $P_s$ ,  $P_f$ ), bainitické ( $B_s$ ,  $B_f$ ) a martenzitické ( $M_s$ ,  $M_f$ ) přeměny [26]. Oba diagramy nám udávají podíl produktů dané přeměny. V rámci IRA diagramů se hranice dané přeměny  $P_s$ ,

$P_f$  a  $B_s$ ,  $B_f$  značí křivkami. Na ARA diagramech podíl přeměny vykazuje číslice umístěná v průsečíku křivky ochlazování s čarou, která udává spodní hranici příslušné transformační oblasti. ARA diagram na ose „x“ zobrazuje hodnoty tvrdosti odpovídající výsledné struktuře po ochlazení podle odpovídající křivky ochlazování.

### 3.2.1 Diagram anizotermického rozpadu austenitu ARA

Jelikož při zhotovování výrobků z nástrojových ocelí nás hlavně zajímá anizotermický rozpad austenitu, budeme se i v této kapitole zabývat diagramem ARA a jevy s tímto procesem spojené. ARA diagram se využívá ve většině procesů tepelného zpracování, kdy austenit transformuje při plynulém ochlazování [24]. V této kapitole se zaměříme na čtení diagramu anizotermického rozpadu austenitu nástrojové oceli X38CrMo16, která se používá při výrobě forem pro zpracování pryže obr. 10.

Uprostřed diagramu ARA si můžeme všimnout křivky, která protíná všechny ochlazovací křivky. Křivka nám znázorňuje hranici austenitu s cementitem kdy poměr austeniticko-cementické struktury se zmenšuje s delší dobou ochlazování. Austeniticko-cementická struktura se nám tedy objeví v kterékoliv přeměně.



Obr. 10: Diagram ARA pro nástrojovou ocel X38CrMo16 [2].

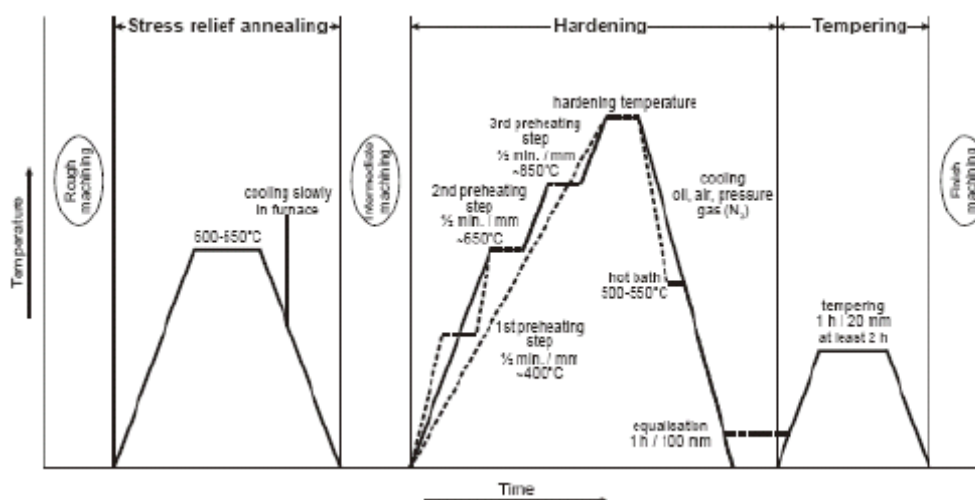
Budeme-li ocel ochlazovat z teplot oblasti stabilního austenitu ( $1040^{\circ}\text{C}$ ) rychlostí podle první křivky z levé strany diagramu, dosáhneme martenzitu s maximální tvrdostí oceli 620HV. Ochlazování probíhá nadkritickou rychlostí a křivka prochází martenzitickou strukturou. Při rychlosti ochlazování podle druhé křivky, dostaneme výslednou strukturu bainitickou. Křivka nám zde protнула bainitickou oblast. Tvrdost oceli se mírně zvýšila a dosahuje hodnot HV627. Prodloužíme-li rychlost ochlazování oceli podle třetí křivky, výslednou strukturou bude opět bainit. Délka ochlazování oceli se poměrně protáhla než u druhé křivky a tvrdost materiálu se snížila na hodnotu HV530. V případě, že ochladíme ocel rychlostí podle čtvrté ochlazovací křivky, dostaneme strukturu bainitickou se zbytky feritu. Ferit zde bude jen výjimečně, protože křivka prochází pouze nosem feritické přeměny. Podle ochlazovací křivky ocel zde dosahuje tvrdosti HV468. Ochlazujeme-li ocel rychlostí podle páté křivky diagramu, výsledná struktura materiálu bude feritická se zbytky bainitu. Je to dáno tím, že křivka ochlazování prochází feritem a nosem bainitické struktury. Náhlou změnou struktury se změní i tvrdost oceli, která bude mít hodnotu HV199. Posledním šestým způsobem ochlazování křivka projde zónou feritu a perlitickým nosem diagramu. Výsledná struktura oceli po transformaci bude tvořena feritem a perlitem. Tvrdost podle této křivky má hodnotu HV182.

Tento diagram je nedílnou součástí při ochlazování stabilního austenitu. Tvar křivek diagramu výrazně ovlivňují legující prvky a jejich obsah v tavbě [24]. Při studování těchto diagramů si musíme dávat pozor na čtení jednotlivých křivek, abychom se nedopustili chyb, když budeme provádět tepelné zpracování oceli.

### 3.3 Diagramy tepelného zpracování oceli

Tyto diagramy schematicky zachycují druhy a průběh procesu tepelného zpracování ocelí. Patří zde: žíhání na snížení pnutí obrobku (po hrubém opracování); kalení na zvýšení tvrdosti (po středním opracování); popouštění (finální opracování). Všechny tyto procesy byly popsány v bakalářské práci Diagnostika nástrojových ocelí [27]. V této práci bude proveden rozbor diagramu tepelného zpracování a popouštěcí graf.

Na obr. 11 je znázorněn diagram základního tepelného zpracování nástrojové oceli X38CrMo16. Zachycuje nám teplotu, při které se má daný proces uskutečnit a čas jak dlouho má proces trvat. Diagram platí pouze pro danou ocel.

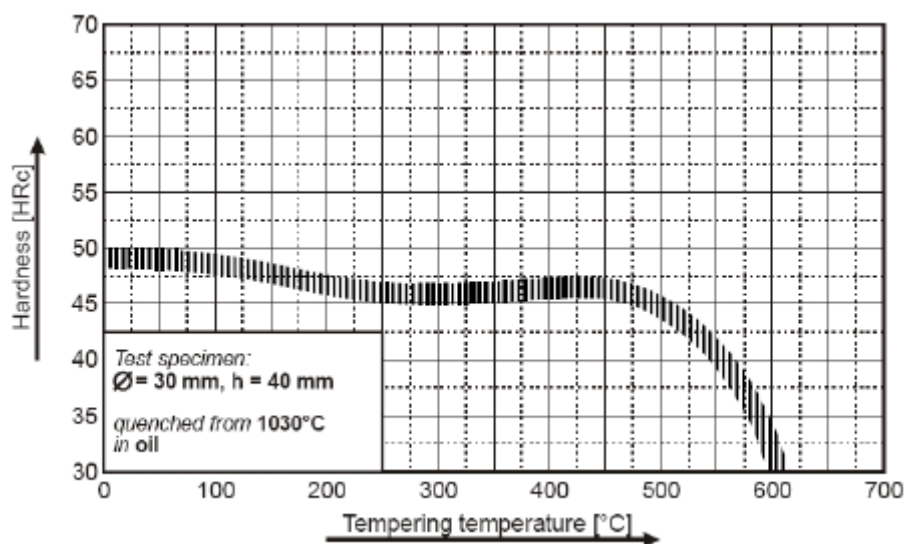


Obr. 11: Diagram tepelného zpracování oceli X38CrMo16 [2].

První sloupec diagramu zachycuje pomalé ohřátí oceli na teplotu 600°C – 650°C, výdrž na této teplotě a následné pomalé ochlazení v peci. Tento proces se využívá při žíhání na odstranění vnitřního pnutí v oceli. Druhý sloupec diagramu vyobrazuje postup ohřátí a ochlazení oceli při kalení. Při kalení této oceli provádíme ohřev materiálu v několika etapách. Nejdříve obrobek ohříváme na teplotu 400°C s rychlostí ½ min./mm. Po dosažení této teploty v celém průřezu obrobku zvýšíme teplotu na 650°C s rychlostí ½ min./mm. Na této teplotě opět setrváme, dokud se neprohřeje celý obrobek. Následně provedeme ohřev na teplotu 850°C s rychlostí ½ min./mm. Opět provedeme výdrž na této teplotě. Po prohřátí celého průřezu obrobku zahřejeme materiál na kalicí (austenitizační) teplotu 1040°C obr. 10. Na této teplotě opět setrváme do prohřátí celého průřezu obrobku. Po výdrži na kalicí teplotě provedeme okamžité ochlazení v oleji. Šokové ochlazení můžeme provést buď na okolní teplotu 20°C (musí následovat popouštění) nebo můžeme materiál ochladit do olejové lázně (pomocí vzduchu) na teplotu 500°C - 550°C a následně provést pomalé ochlazení (popouštění) na okolní teplotu 20°C rychlostí 1h/100mm. Pokud při kalení ochlazujeme na teplotu 20°C musíme provést popouštění oceli, kdy materiál opět ohřejeme ale tentokrát na popouštěcí teplotu. Teplota popouštění závisí na konečné tvrdosti materiálu a stanoví se z popouštěcího diagramu obr. 12. Dosáhneme-li popouštěcí teploty, setrváme na této teplotě alespoň 2 hodiny, abychom prohřáli celý průřez obrobku – třetí sloupec obr. 11. Po dosažení požadované výdrže na teplotě obrobek necháme pozvolna vychladnout na okolní teplotu 20°C.



Popouštění se provádí proto, abychom odstranili vnitřní pnutí, které vzniklo při šokovém ochlazení oceli. Tímto procesem se zlepšují mechanické vlastnosti materiálu a fixuje se konečná tvrdost obrobku. Velikost konečné tvrdosti obrobku závisí na výši popouštěcí teploty, chemickém složení a provozních podmínkách výrobku [24]. Na obr. 12 je znázorněn popouštěcí diagram oceli X38CrMo16, který zachycuje závislost teploty na konečné tvrdosti materiálu. Popouštěcí diagram je pro každou ocel odlišný a jedinečný.



Obr. 12: Popouštěcí diagram oceli X38CrMo16 [2].

Při tepelném zpracování musíme dodržet správný technologický postup ohřátí a ochlazení oceli. Pokud bychom mohutný obrobek ohřívali rychleji, než je stanoveno, mohlo by dojít k vysokému vnitřnímu pnutí a následně k výrazné nevratné tvarové deformaci obrobku. Diagram tepelného zpracování je zásadně určen pro jednu danou ocel. Výsledná tvrdost výrobku závisí na rychlosti ochlazování, kalící a popouštěcí teplotě. Výše teploty tepelného zpracování oceli určíme z diagramu ARA, popouštěcího diagramu a diagramu tepelného zpracování.

## 4 ZKUŠEBNÍ METODY VLASTNOSTÍ OCELI

Pro zajištění dostatečné životnosti a provozní spolehlivosti produktu potřebujeme znát konečné vlastnosti materiálu a jejich charakter. Potřebné atributy materiálu zjistíme zkušebními postupy s následným vyhodnocením. Zkoušení vlastností kovových materiálů můžeme rozdělit na zkoušky s porušením materiálu (destruktivní) a na zkoušky bez porušení materiálu (nedestruktivní) [7].

Mezi zkoušky destruktivní patří všechny mechanické a technologické zkoušky, i když jsou zkoumány statickým nebo dynamickým namáháním. Pro příklad můžeme uvést zkoušku tahem, tlakem, krutem, Vickerse, Rockwella, únavové a další [28]. Jedná se o zkoušky, u kterých se musí degradovat materiál, abychom dosáhli požadovaných výsledků vlastností jako je tvrdost, houževnatost, pevnost a jiné.

Do nedestruktivních zkoušek se řadí metody, u kterých nedochází k degradaci materiálu. Zde patří například zkoušky prozařovací, ultrazvukové, elektromagnetické, kapilární a další. Hlavní cílem nedestruktivních zkoušek je zjištění skrytých povrchových i vnitřních vad (trhlin, vměstků, bublin aj.) [28], které porušují celistvost materiálu a ohrožují tím bezpečný provoz výrobku.

Pro stanovení vlastností materiálu na výrobu formy nám postačí zkoušky vtiskové podle Rockwella a Vickerse, zkouška houževnatosti a prokalitelnosti. Vtiskové zkoušky byly popsány v bakalářské práci Diagnostika nástrojových ocelí [27]. V této práci se zaměříme pouze na zkoušku vrubem a zkoušku prokalitelnosti.

### 4.1 Zkouška rázem v ohybu

Některé kovové materiály, byť mají vysoké hodnoty statických mechanických vlastností, jsou přesto málo odolné proti dynamickému namáhání a snadno se lámou při rázu. Při rázu probíhá deformace velkou rychlostí a není přitom dost času na vyrovnání nerovnoměrně rozloženého napětí v jednotlivých zrnech kovu jako při statickém namáhání. Ve zkušebnictví se dynamické namáhání vyjadřuje jako vrubová houževnatost. Zkouška vrubové houževnatosti se provádí podle normy ČSN EN 10 045, která se dělí na dvě části:

- ČSN EN 10 045 – 1: Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho - Zkušební metoda [8].

- ČSN EN 10 045 – 2: Kovové materiály – Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho -  
Ověřování kyvadlových kladiv.

Zkouška se provádí na Charpyho rázovém kladivu, které výkyvem kolem osy otáčením přerazí při průchodu spodní polohou zkušební tyč. Po přelomení, následkem nespotřebované energie, pokračuje kladivo v překmitu. Výška překmitu je úměrná rozdílu energie kladiva před rázem a spotřebované energie během rázu [7]. Spotřebovanou nárazovou práci odečteme přímo na stupnici zkušebního stroje. Následně vypočteme pomocí vzorce (1) vrubovou houževnatost. Změřená nárazová práce se označuje podle použitého vrubu buď KU (pro U vrub), nebo KV (pro V vrub).

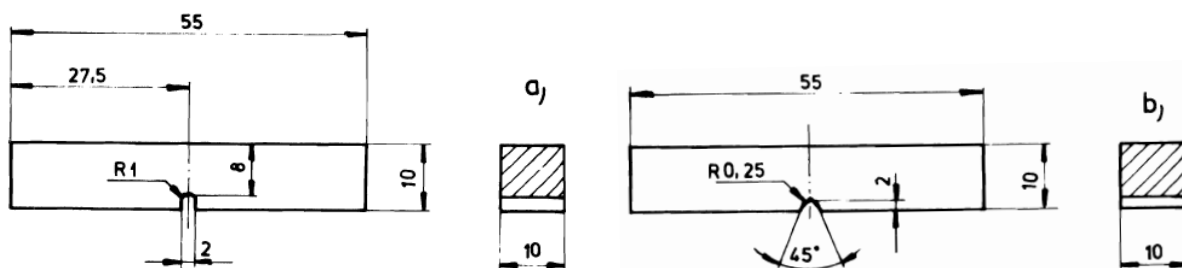
$$KC = \frac{K}{S_0} \left[ \text{J.cm}^{-2} \right] \quad [20] \quad (1)$$

KC – vrubová houževnatost KCU nebo KCV [ $\text{J.cm}^{-2}$ ]

K – nárazová práce [J]

$S_0$  – plocha průřezu tyče pod vrubem [ $\text{cm}^2$ ]

Při zkoušce se přeráží zkušební tyč čtvercového průřezu buď s V vrubem, nebo U vrubem uprostřed zkoušené délky, která se volně vkládá na podpěry zkušebního stroje [7]. Ráz kladiva působí mezi podpěry středem zkušební tyče na stranu proti vrubu. Rozměry a vrub zkušební tyče jsou normované podle normy ČSN EN 10 045 [8]. Většinou se používá zkušební tyč o rozměrech 10x10x55mm s U vrubem hlubokým 2mm nebo 3mm a V vrubem hlubokým 2mm obr. 13.



Obr. 13: Zkušební tyče pro zkoušení vrubové houževnatosti [20].

a – zkušební tyč s U vrubem; b – zkušební tyč s V vrubem

Značení vrubové houževnatosti se provádí podle tvaru a hloubky vrubu, který jsme použili při zkoušení. Pro tyč s U vrubem hlubokým 2mm je značení KCU2 a s vrubem

hlubokým 3mm se značí KCU3 [8]. Vrubová houževnatost změřena na tyči s V vrubem hlubokým 2mm se označuje pouze KCV.

Výsledek zkoušky houževnatosti výrazně závisí na teplotě zkušebního vzorku. Obvykle se zjišťuje celý průběh závislosti vrubové houževnatosti v rozmezí teplot  $T_1 \div T_2$ . Výsledkem tohoto zkoumání je výsledná přechodová teplota  $T_p$ , která se určí jako inflexní bod křivky [7]. Polohu přechodové teploty je možné ovlivnit čistotou oceli, velikostí zrna, tepelným zpracováním, přísadovými prvky a dalšími způsoby. Přechodová teplota je důležitým kritériem k určení vhodné oceli pro danou pracovní teplotu.

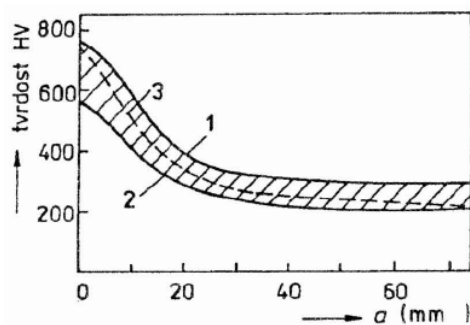
## 4.2 Zkouška prokalitelnosti

K určení prokalitelnosti materiálu může být použito mnoho metod. V současné době se za průkaznou a nejpoužívanější považuje čelní zkouška prokalitelnosti (Jominiho zkouška), kterou specifikuje norma ČSN EN ISO 642 – Ocel: Čelní zkouška prokalitelnosti (zkouška podle Jominyho) [9].

Základ zkoušky spočívá v austenitizaci standardního válcovaného tělesa o rozměrech ( $\varnothing 25\text{mm}$ ; délka 100mm). Vzorek se nejprve zahřeje na teplotu austenitizace následuje  $\frac{1}{2}$  hodinová výdrž na této teplotě a ve svislé poloze čelem dolů se proudem vody ochlazuje čelo vzorku [26]. Po zakalení se na válcové ploše vzorku vybrousí dvě rovnoběžné plošky do hloubky 0,4mm, na kterých se následně změří tvrdost materiálu (HRC nebo HV) v předem určených vzdálenostech.

Zjištěné hodnoty tvrdosti se zapisují do grafu. Na osu „y“ se zapisují hodnoty tvrdosti a na osu „x“ vzdálenost od zakaleného čela. Spojením těchto bodů získáme výsledek této zkoušky což je křivka prokalitelnosti obr. 14. Křivka nám udává závislost tvrdosti materiálu na vzdálenosti od ochlazovaného čela [9]. Jelikož normy povolují u stejné značky oceli určitou odchylku chemického složení, tudíž i křivky prokalitelnosti budou odlišné. Proto byl stanovený určitý pás prokalitelnosti, ve kterém by měly ležet jednotlivé křivky prokalitelnosti oceli dané značky obr. 14.

Prokalitelnost se může vyjadřovat indexem prokalitelnosti. Skládá se z písmene J, dvou skupin číslic udávající stupeň tvrdosti podle Rockwella nebo Vickerse a vzdálenost měření tvrdosti  $d$  [mm] od kaleného čela [24]. Například pro ocel tvrdosti 460HV ve vzdálenosti 15mm od čela vzorku bude označení J460 – 15.

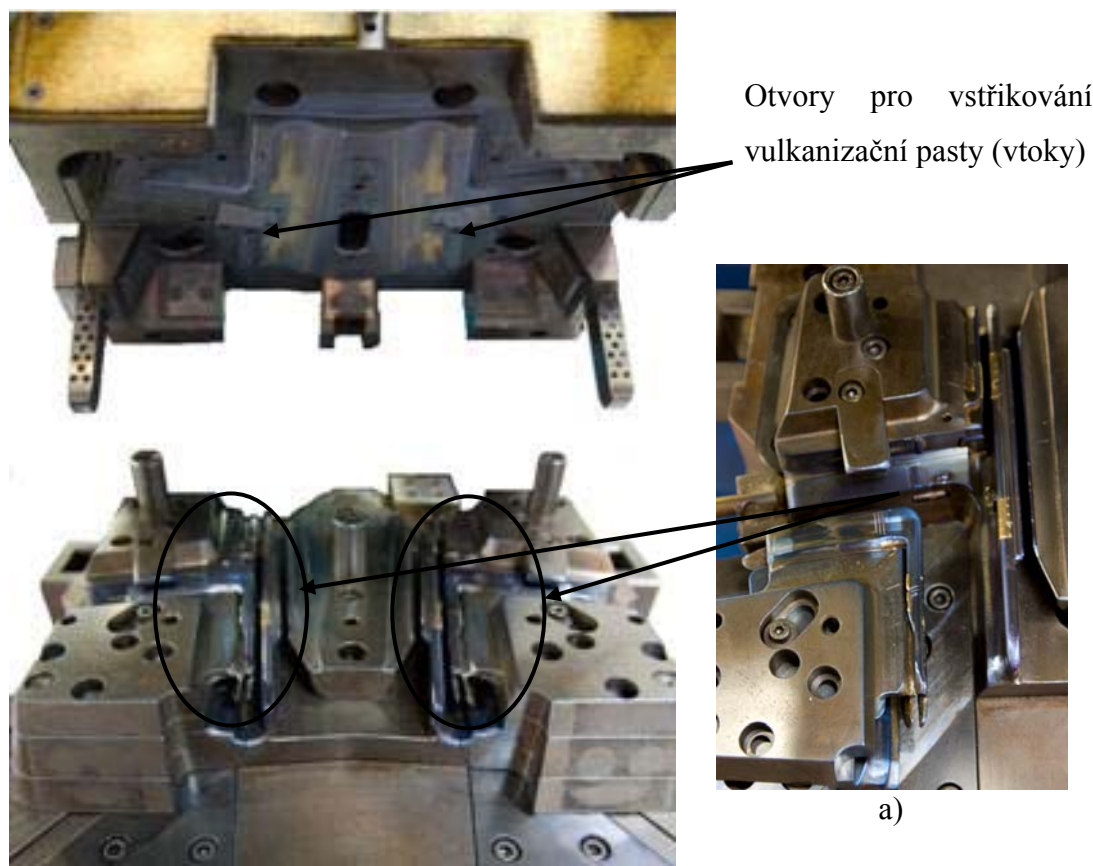


Obr. 14: Schéma pásu prokalitelnosti oceli ČSN EN 14 220. 1, 2 – hranice pásu prokalitelnosti; 3 – konkrétní křivka prokalitelnosti [26]

Všechny uvedené zkoušky jsou důležitým podkladem pro stanovení životnosti a minimální poruchovosti konečného výrobku. Při prvotním návrhu si musíme vždy uvědomit, jaké vlastnosti musí splňovat materiál, který budeme navrhovat pro daný výrobek a do jaké míry potřebujeme tyto vlastnosti prozkoumat. Každá z uvedených zkoušek není levnou záležitostí, a pokud bychom navrhli být jednu zbytečnou zkoušku, výrazně tím zvýšíme cenu výrobku.

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

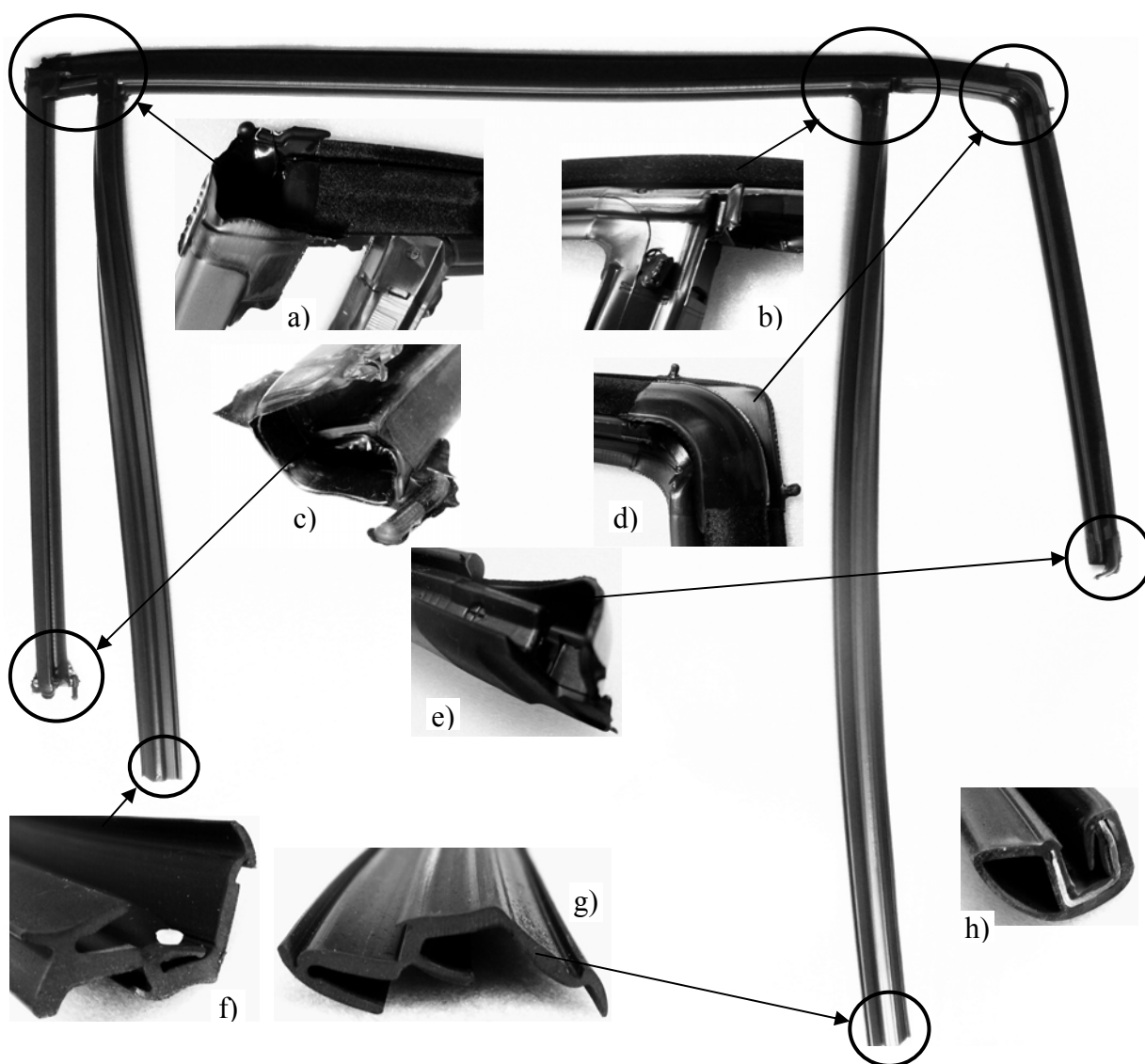
Cílem této experimentální práce je navrhnout způsob, jak nejlépe zvýšit mechanické vlastnosti materiálu forem, na kterých se vyrábí výrobky z pryže obr. 15. Firma, která si nechala tuto analýzu provést, nakoupila formy na lisování pryže od dvou různých dodavatelů. Jeden typ forem nechala vyrobít v Německu a druhý v Číně. Formy, které byly vyrobené v Německu, jsou bezporuchové, kdežto u forem zhotovených v Číně dochází často k praskání a rychlému opotřebení pracovní části formy obr. 15a.



Obr. 15: Horní a spodní díl formy pro výrobu dílů z pryže; a – detail pracovní části formy

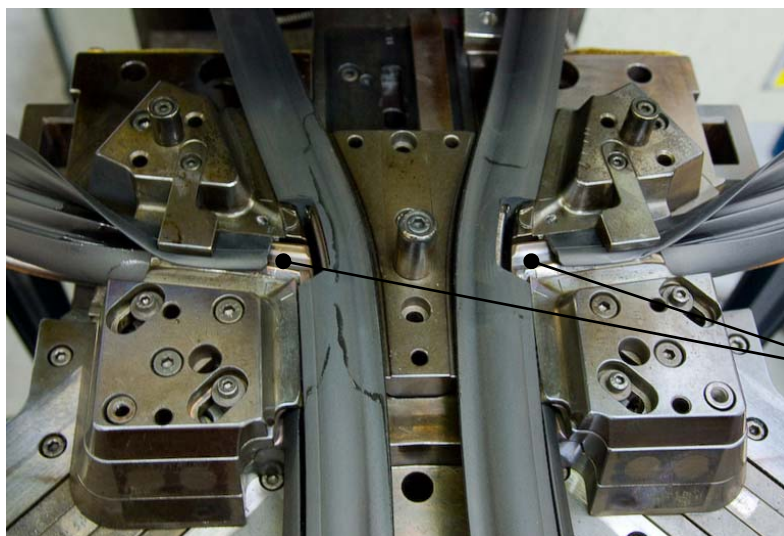
Formy se používají pro spojování polotovarů vyrobených z EPDM (etylen propylen dien monomer) pryže. Vlastní výroba konečného dílu obr. 16 probíhá spojováním polotovarů různě extrudovaného profilu po vstříknutí vulkanizační pasty do určitého místa uzavřené formy za působení vysokého tlaku. Místo pro vstříknutí směsi je dáno konstrukci a technologii výroby výrobku obr. 16a÷e.

Polotovary jsou vyrobené z extrudované pryže o určitém profilu. Mohou být, buď bez výztuže nebo s výztuží a to ocelovou nebo hliníkovou obr. 16f÷h. Při výrobě polotovarů a vulkanizační pasty mohou být použity dva druhy EPDM směsi. Druh směsi záleží na vulkanizačním činidle, které může být buď peroxidické, nebo sirnaté. Do EPDM směsi se dále přimíchávají složky, jako jsou saze, křída, kaolín, olejnaté složky a další. Zlepšují se tím vlastnosti EPDM směsi a konečného výrobku. Množství složek obsažených v směsi záleží na tom, pro jaký účel bude daný výrobek sloužit, jaké vlastnosti musí splňovat, ale také na technologickém zpracování EPDM hmoty.



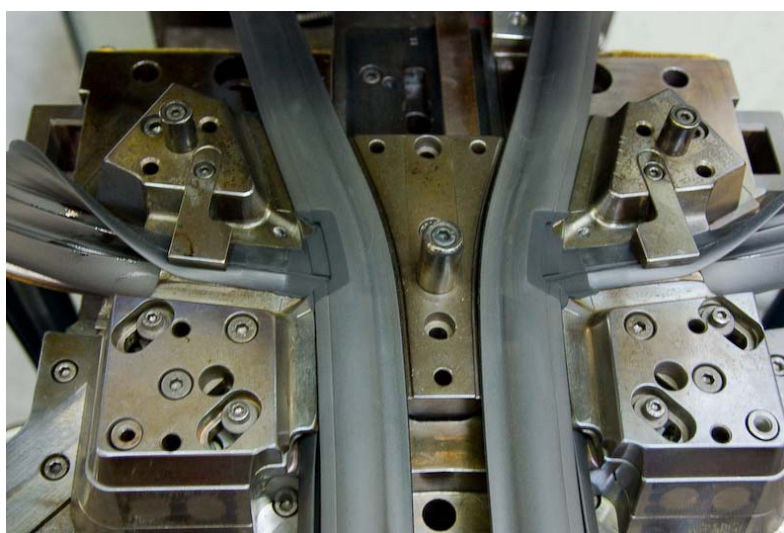
Obr. 16: Vzhled dveřního těsnění po zalisování EPDM směsi. Dveřní těsnění je vyrobeno z 5ks polotovarů; a ÷ e - detailní foto z vulkanizovaného spojení pomocí EPDM směsi; f, g – náhled tvaru polotovaru bez výztuže; h – náhled tvaru polotovaru s výztuží

Vlastní lisování se provádí tak, že se nejdříve nasunou polotovary na pracovní část formy do určité pozice obr. 17. Po nasunutí dílů, se vrchní a spodní díl formy uzavře pomocí vysokotlakého lisu a proběhne vstříknutí vulkanizační pasty do volného prostoru mezi dva polotovary a formu obr. 17. V této době začne probíhat vulkanizace směsi po předem stanovenou dobu. Po dokončení vulkanizace, se forma opět otevře a zhotovený výrobek se vyjme z formy obr. 18. Před expedicí do automobilky se musí provést kontrola výrobku, a odstranit přetoky pryže, které vznikly při lisování obr. 16a÷e.



Místo, které se  
vyplní EPDM  
směsí

Obr. 17: Spodní díl formy s nasunutými polotovary (před vstříknutím vulkanizační směsi)



Obr. 18: Spodní díl formy s výrobkem (po zalisování, vstříknutí a vulkanizaci vulkanizační směsi)



Na materiál formy jsou kladeny vysoké nároky na houževnatost a tlak, kdy nástroj musí, odolávat tlakům působícího z lisu a nesmí docházet k vyламování pracovní části formy. Dále musí být odolný vůči otěru, aby nedocházelo k rychlému opotřebení formy vlivem nasouvání a sesouvání výrobku. Jelikož je materiál formy namáhán v rozmezí teplot 220°C až 250°C, musí být zajištěno, aby si tyto vlastnosti zachoval i za těchto pracovních teplot. Celková životnost formy se odhaduje na 5 let nepřetržitého provozu při 220 kusech za směnu. Je nutné, aby forma vydržela  $10^6$  cyklů, načež by měla odolávat proti tlaku, otěru, tepelné a kontaktní únavě.

## **5.1 Zkoumání chemických a strukturních vlastností vzorků**

Zkoumáním materiálové struktury a chemického složení neznámého vzorku docílíme zjištění jednotlivých přeměn (struktur), které proběhly při tepelném zpracování, a určíme množství legujících prvků obsažených v oceli. Zjištění materiálové struktury a množství prvků obsažených v oceli budeme zkoumat pomocí mikroskopů. Před samotným provedením zkoušek je třeba provést odběr vzorků pro jednotlivé analýzy. Velikost a tvar vzorku je přesně definován normou ČSN EN ISO 643 Ocel - Mikrografické stanovení velikosti zrn [19].

### **5.1.1 Metalografická analýza**

Rozbor množství chemických příměsí v ocelových vzorcích byl proveden na VŠB TU v Ostravě v laboratoři analytické chemie FMMI. Vlastní analýza byla provedena pomocí optického emisního spektrometru LECO GDS 750A. Přístroj slouží pro stanovení chemického složení kovových materiálů a umožňuje kvantitativní chemickou analýzu kovů a slitin s následným vyhodnocením.

Spektrometr pracuje na principu vyražení atomů z materiálu pomocí doutnavého výboje s jejich následným zpracováním. Výsledkem zkoumání je grafický záznam, kde jsou vyobrazeny závislosti intenzity signálu jednotlivých prvků na době od počátku analýzy. Z grafického zápisu získáme kvantitativní data o základním složení materiálu nebo o složení jednotlivých postupně nanesených vrstev. Na spektrometru můžeme provádět analýzu chemického složení materiálu nebo samotných povrchových vrstev.

### 5.1.2 Mikroskopická analýza

Pozorování a rozbor mikroskopického zkoumání struktury vzorků byl proveden na VŠB TU v Ostravě v laboratoři metalografie FMML. Vlastní sledování bylo provedeno na světelném mikroskopu Olympus IX 70. Mikroskopickým zkoumáním vzorků zjistíme, jakými strukturními přeměnami procházel daný výrobek, z čehož následně můžeme stanovit druh tepelného zpracování.

Před samotnou mikroskopickou analýzou je zapotřebí precizní příprava daného vzorku. Příprava vzorku se dělí na několik částí: broušení, leštění, leptání. Uvedené kroky výrazně ovlivňují kvalitu výsledné mikroskopické analýzy a je nezbytné dodržet stanovený postup a preciznost daných kroků. Konečný povrch zkoumané pozorované plochy vzorku musí být bez rýh, drážek po broušení a musí být lesklý a důkladně čistý.

Broušení budoucí pozorované plochy vzorku provádíme proto, abychom docílili, co nejmenší drsnosti materiálu. Vlastní broušení provádíme pomocí brusného papíru a to od nejhrubšího zrna až po nejmenší zrno. Při broušení musíme dbát na to, aby byl vzorek dostatečně chlazen. Nesmí dojít k jeho ohřátí, protože by došlo ke zničení připravované pozorované plochy.

Dalším krokem pro dokonalý povrch vzorku je leštění. Je to obdobný proces jako při broušení. Rozdílný je pouze materiál pro leštění, kdy se používá textilní sukno s přidavkem kapalně emulze  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Při leštění musíme opět provádět chlazení kapalinou, aby nedošlo vlivem tření k tepelné deformaci povrchu vzorku. Zkoumanou plochu vzorku leštíme až do zrcadlového lesku.

Po vyleštění, opláchnutí a osušení provedeme leptání vzorku, abychom zviditelnili jednotlivé strukturní vrstvy. Leptáním rovněž odstraníme povrchovou vrstvu, která vznikla při broušení a leštění. Leptání vzorků můžeme provádět roztoky Nital, Vogel atd. Jsou to roztoky kyseliny dusičné nebo chlorovodíkové s dalšími příměsemi.

Po perfektním vybroušení, leštění a leptání provedeme úplné očištění a osušení pozorované plochy vzorku. Následně můžeme provést samotnou mikroskopickou analýzu vzorku. Vzorek vložíme leštěnou plochou pod mikroskop, zaostříme optiku mikroskopu a následně zkoumáme. Vlastní zkoumání provádíme buď ve světlém poli – paprsky světla dopadají kolmo na plochu vzorku, nebo v tmavém poli – paprsky světla dopadají šikmým osvětlením na plochu výbrusu.

## **5.2 Zkoušení mechanických vlastností vzorků oceli**

Mechanické zkoušky neznámých vzorku oceli provádíme proto, abychom zjistili, jakými vlastnostmi daný výrobek převládá a jakou má odolnost vůči určitým vlivům. U ocelí pro výrobu forem na pryž s tuhými příměsemi se hlavně vyžaduje, aby měly určitou tvrdost a houževnatost. Tyto dva základní požadavky určíme pomocí Vickersovy a zkoušky vrubové houževnatosti na Charpyho stroji.

### **5.2.1 Vickersova zkouška**

Zkouška tvrdosti vzorku byla provedena v laboratoři zkoušení materiálů na VŠB TU v Ostravě katedry FMML. Vlastní zkouška byla vykonána při okolní teplotě 20°C pomocí Vickersova tvrdoměru HPO250 podle normy ČSN EN ISO 6507-1 (420374). Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda [11].

Vickersova zkouška tvrdosti spočívá ve vtlačování pravidelného čtyřbokého jehlanu do povrchu materiálu po předem určenou dobu. Po odlehčení se změří délka úhlopříčky vtisku  $d_1$ ,  $d_2$  [mm] a vypočítá se aritmetický průměr jejich délek. Následně se z tabulek zjistí nejbližší naměřené hodnoty úhlopříček a určí tvrdost povrchu zkušební vzorku.

### **5.2.2 Charpyho zkouška**

Zkouška vrubové houževnatosti vzorku byla provedena v laboratoři zkoušení materiálů na VŠB TU v Ostravě katedry FMML. Vlastní zkouška byla vykonána při okolní teplotě 20°C na Charpyho kladivu podle normy ČSN EN 10045-1 (420381). Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho - Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby) [8]. Na zkušebním vzorku byl zhotoven vrub ve tvaru V s hloubkou 2mm podle normy ČSN EN 10 045.

Zkouška vrubové houževnatosti se provádí tak, že se připravený vzorek vloží na střed podpěry zkušebního stroje tak, aby vrchol vrubu vzorku směřoval proti kladivu, a následně provede spuštění Charpyho kladiva. Stroj nám zobrazí hodnotu nárazové práce, kterou bylo potřeba vykonat pro přelomení daného vzorku. Hodnotu vrubové houževnatosti následně vypočteme pomocí rovnice (1). Kvalita provedení zkoušky spočívá v precizní přípravě vzorku a v provedení samotné zkoušky.

## 5.3 Vyhodnocení experimentálních výsledků

Abychom mohli navrhnout správnou technologii zvýšení integrity nástrojových oceli na formy, potřebujeme znát základní vlastnosti daného materiálu. Pro správné určení charakteristiky oceli na formy vyrábějící výrobky z pryže musíme znát chemické složení materiálu, druh strukturní přeměny, tvrdost materiálu, a velikost vrubové houževnatosti. Tyto vlastnosti a charakteristiky jsme zkoumali v experimentálních metodách a v této kapitole provedeme jejich analýzu.

### 5.3.1 Vyhodnocení chemické analýzy

Chemickou analýzou získáme množství legujících prvků, které jsou obsaženy ve vzorcích. Vzorky pro chemickou analýzu byly odebrány po dvou kusech z každé formy. První vzorek byl odebrán z formy vyrobené v Německu a označen 1N a 2N. Druhý vzorek byl odebrán z formy vyrobené v Číně a byl označen 1C a 2C. Oba vzorky byly odřezány z nejkritičtějšího místa nástroje a to přímo z pracovní části formy obr. 15a. Naměřené hodnoty chemického složení jednotlivých vzorků byly po vyhodnocení zapsány do tabulky 1 a 2.

V tabulce 1 jsou zapsány naměřené hodnoty obsahu prvků ve vzorcích z formy, která byla vyrobena v Německu. Z naměřených hodnot vidíme, že se jedná o ocel, která má zvýšený obsah chromu, manganu a molybdenu. Tyto oceli jsou označovány jako chrom-mangan-molybdenové nástrojové oceli.

Tabulka 1: Chemická analýza vzorku z formy vyrobené v Německu;  $\bar{X}$  - průměrná hodnota ze tří měření; R – rozpětí  $R = X_{\max} - X_{\min}$

Prvek	1N		2N	
	$\bar{X}$ [hm%]	R [hm%]	$\bar{X}$ [hm%]	R [hm%]
C	0,631	0,011	0,624	0,010
Mn	0,748	0,020	0,719	0,030
Si	0,252	0,009	0,264	0,027
P	0,021	0,001	0,022	0,002
S	0,003	0,001	0,004	0,001
Cr	16,485	0,527	16,226	0,573
Ni	0,652	0,001	0,648	0,035
Mo	0,964	0,015	0,942	0,053
V	0,116	0,002	0,115	0,006
W	0,106	0,002	0,109	0,008
Cu	0,095	0,002	0,095	0,009
Fe	80,060	1,430	81,590	0,340

Pokud porovnáme hodnoty z tabulky 1 s hodnotami v materiálových listech nástrojových ocelí, dojdeme k závěru, že vzorek je podle normy EN ISO 4957 nejbližší podobný oceli X38CrMo16 tabulka 2. Srovnáme-li obě tabulky, dojdeme k závěru, že množství prvků obsažených v ocelích se liší obsahem uhlíku. Tento rozdíl může být způsoben nauhličením zkoumané vrstvy z důvodu přechodu uhlíku za zvýšených teplot z EPDM směsi do materiálu formy. Ocel X63CrMoNi16-1, která odpovídá přesné analýze vzorku, nebyla v normách nalezena.

Tabulka 2: Normované chemické složení oceli X38CrMo16 [13].

Chemický prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
Množství prvků [hm%]	0,33 - 0,43	max. 1,00	max. 1,00	max. 0,030	max. 0,030	15,00 - 17,00	max. 1,00	1,00 - 1,30

Ocel v tabulce 2 X38CrMo16 je martenzitická korozivzdorná s dobrou obrobitelností v žíhaném stavu. Po zakalení ocel dobře vzdoruje otěru a vyznačuje se dobrou leštitelností. Ocel je vhodná pro nástroje na formy, které zpracovávají chemicky agresivní hmoty případně obsahující abrazivní složky. Přísada molybdenu zvyšuje odolnost vůči korozi a otěru.

V tabulce 3 vidíme zapsané naměřené hodnoty chemických prvků vzorků odebraných z formy, která byla vyrobena v Číně. Z výsledných hodnot vidíme, že se jedná o nízkolegovanou chrom-mangan-molybdenovou nástrojovou ocel. Materiál se využívá zejména k zušlechťování a následně k výrobě forem, které zpracovávají plasty.

Tabulka 3: Chemická analýza vzorku z formy vyrobené v Číně;  $\bar{X}$  - průměrná hodnota ze tří měření; R – rozpětí  $R = X_{\max} - X_{\min}$

Prvek	1C		2C	
	$\bar{X}$ [hm%]	R [hm%]	$\bar{X}$ [hm%]	R [hm%]
C	0,374	0,006	0,374	0,002
Mn	1,785	0,330	1,783	1,100
Si	0,380	0,002	0,389	0,040
P	0,017	0,001	0,017	0,001
S	-	-	-	-
Cr	1,820	0,023	1,847	0,151
Ni	0,277	0,002	0,276	0,014
Mo	0,276	0,004	0,276	0,014
V	0,077	0,002	0,077	0,003
W	0,107	0,001	0,109	0,012
Cu	0,007	0,000	0,007	0,002
Fe	75,28	0,99	76,35	0,590

V případě, že srovnáme naměřené hodnoty z tabulky 3 s hodnotami v materiálových listech nástrojových ocelí, zjistíme, že materiál formy se podle normy EN ISO 4957 nejbližší shoduje s ocelí 40CrMnMo8-6 tabulka 4. Porovnáme-li vzorky oceli vyrobené v Číně s ocelí 40CrMnMo8-6, dojdeme k závěru, že se jednotlivé oceli mírně liší v procentech obsahu manganu. Tato odchylka může vzniknout chybou při měření nebo nestejnorodou strukturou oceli. V tabulce 3 vidíme, že hodnota R vykazuje určitou odchylku. Ocel 37CrMo7-7-3, která odpovídá přesné analýze vzorku, nebyla v normách nalezena.

Tabulka 4: Normované chemické složení oceli 40CrMnMo8-6 [13].

Chemický prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo
Množství [hm%]	0,35 - 0,45	1,40 - 1,60	0,30 - 0,50	max. 0,030	0,05 - 0,10	1,80 - 2,00	0,15 - 0,25

Ocel 40CrMnMo8-6 je vhodná ke kalení na vzduchu nebo v oleji s velmi dobrou prokalitelností a pevností za tepla. Využívá se zejména na nástroje pro zpracování umělých hmot, formovací rámy k lití plastických hmot a kovů pod tlakem. Lze ji také použít pro méně náročné nástroje.

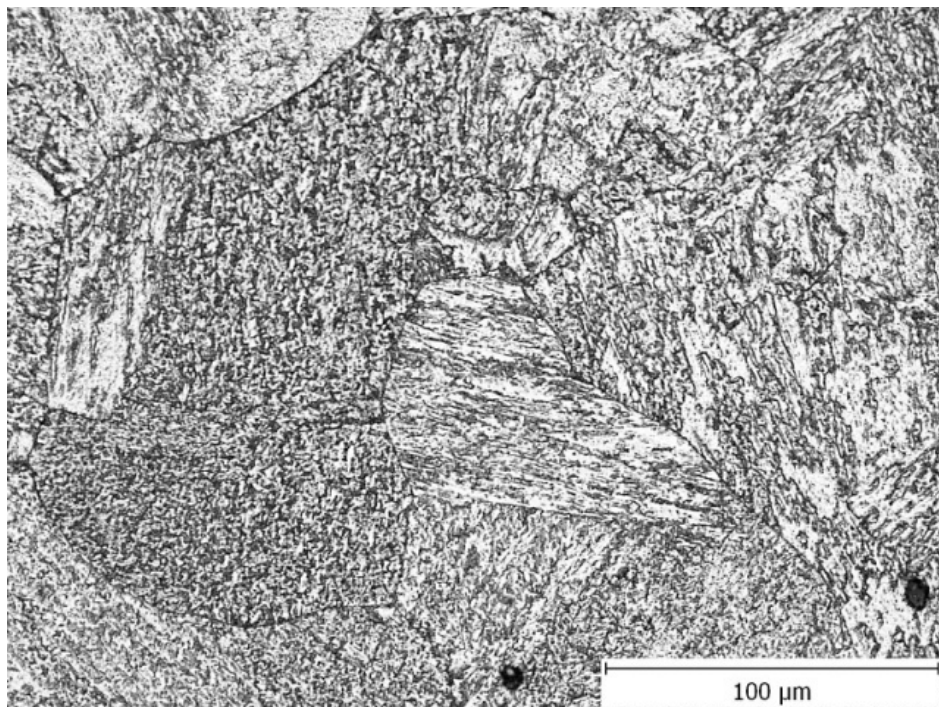
### 5.3.2 Mikroskopická analýza

Mikroskopickou analýzou zjistíme druh strukturní přeměny, kterými prošel neznámý materiál obou forem při tepelném zpracování. Po srovnání jednotlivých struktur budeme schopni určit technologický postup tepelného zpracování formy vyrobené v Číně, abychom zvýšili integritu materiálu. Vzorky pro mikroskopickou analýzu byly odebrány z pracovní části, kde je forma nejvíce namáhána. Vlastní pozorování struktury bylo provedeno pomocí světelného mikroskopu Olympu IX 70.

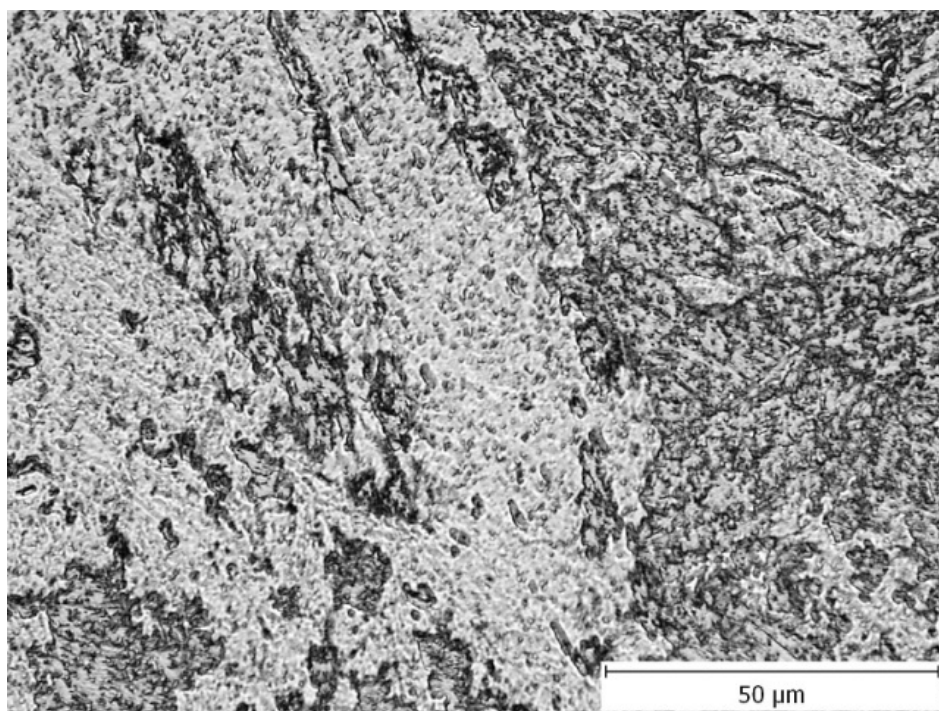
Na následujícím obrázku 19 můžeme pozorovat mikrostrukturu oceli, která byla pořízena z formy vyrobené v Číně. Vzorek byl před samotnou analýzou vybroušen a vyleštěn pomocí textilního sukna do zrcadlového lesku. Poté bylo provedeno leptání vzorku v roztoku Vogel (4% roztok kyseliny chlorovodíkové, dusičné a vody) a následné důkladné očištění lihem. Po dokonalém vyleštění a vyčištění se provedla analýza vzorku na světelném mikroskopu Olympus IX 70.

Na obrázku 19 vidíme vyobrazenou mikrostrukturu vzorku oceli z formy vyrobené v Číně. Můžeme zde pozorovat bainitickou strukturu, ve které se vyskytuje spousta karbidů.

Karbidy se vyskytují jak na hranicích zrna, tak i uvnitř. Na hranicích zrna se vyjmají jako hrubé částice, kdežto v zrna se objevují jako síťoví. V zrna jsou karbidy tvořeny především legujícími prvky chromu, kdežto na hranicích zrna manganem.



a) zvětšení 500x



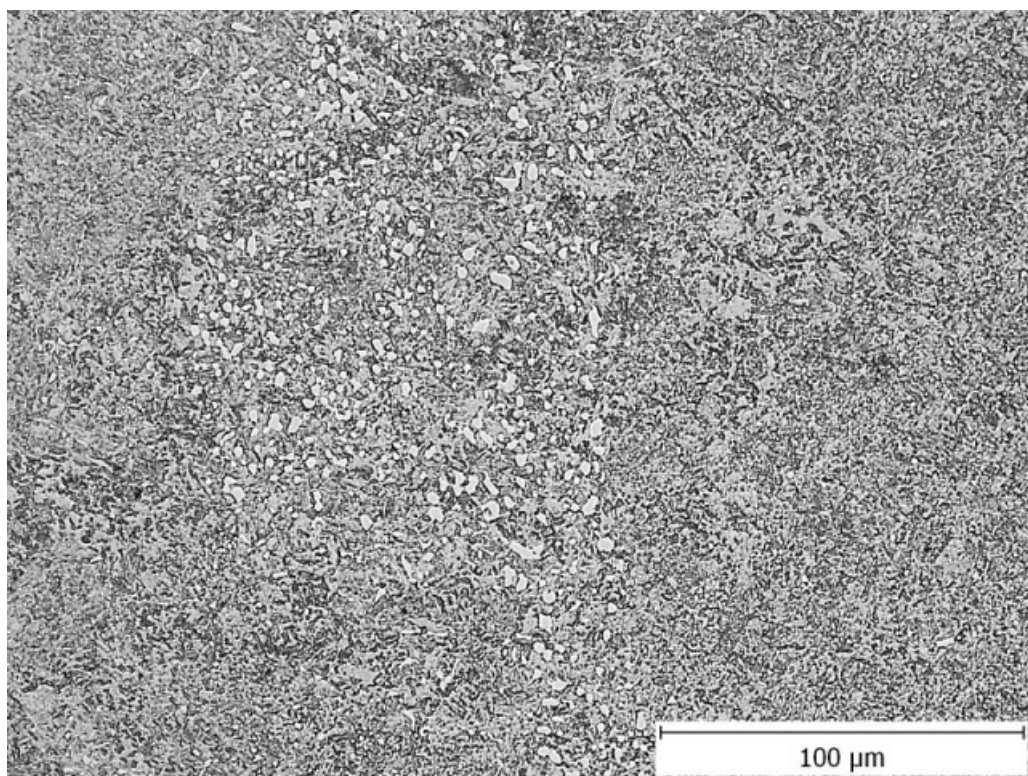
b) zvětšení 1000x

Obr.: 19: Mikrostruktury oceli z formy vyrobené v Číně. Leptáno 4% Vogel.

Ve struktuře vzorku můžeme pozorovat původní středně hrubé austenitické zrno a také velmi hrubé současné zrno. Celková mikrostruktura je velmi hrubozrnná, což odpovídá podle normy ČSN EN ISO 643 velikosti 2 až 3. Velikost původního austenitického zrna je podle uvedené normy v rozmezí stupně 6 až 7. Zrna vzniklé po tepelném zpracování jsou hrubá a podle normy ČSN EN ISO 643 v rozmezí stupnice 1 až 2. Struktura je tedy nerovnoměrná, což má velký vliv na konečné vlastnosti materiálu. Ve struktuře oceli můžeme také pozorovat menší nečistoty a vměstky.

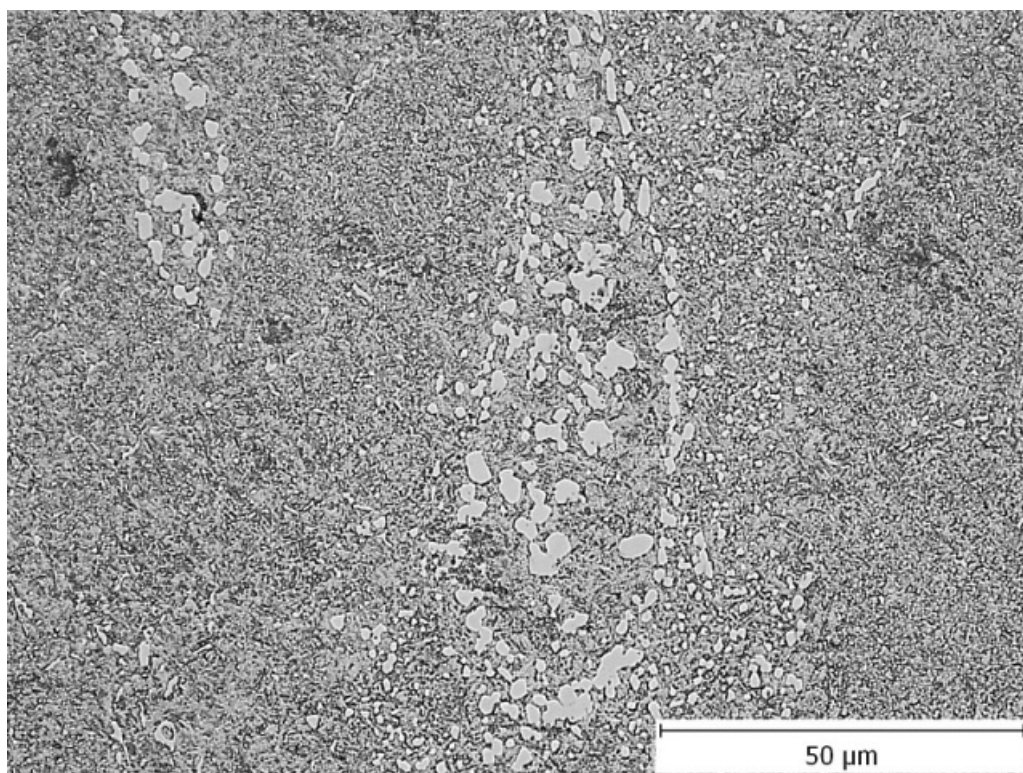
Na následujícím obrázku 20 můžeme pozorovat strukturu oceli, která byla pořízena z formy vyrobené v Německu. Vzorek byl před samotnou analýzou vybroušen stejným způsobem, jako byl připraven vzorek z Čínské oceli. Po vyleštění bylo provedeno leptání vzorku v roztoku Nital (3% roztok kyseliny dusičné ve thylalkoholu) a následné očištění lihem. Po dokonalém vyleštění a vyčištění se provedla analýza vzorku na světelném mikroskopu Olympus IX 70.

Obrázek 20 nám vyobrazuje mikrostrukturu vzorku oceli z formy vyrobené v Německu, která se zcela odlišuje od struktury vzorku z formy vyrobené v Číně. Struktura oceli je zde bainitická, která obsahuje spoustu karbidů. Karbidy se objevují v celé struktuře oceli jako shluky nebo v řádcích. Mikrostruktura obsahuje především karbidy chromu.

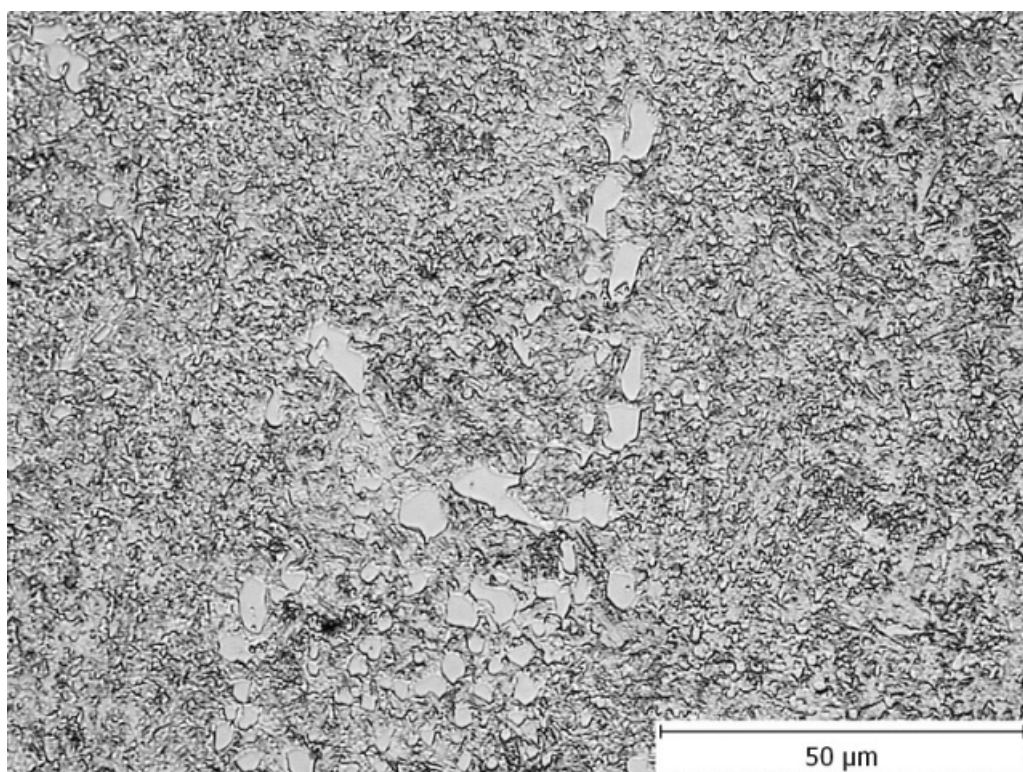


a) zvětšení 500x





b) zvětšení 1000x



c) zvětšení 500x

Obr.: 20: Mikrostruktury oceli z formy vyrobené v Německu. Leptáno 3% Nital.

Ve struktuře vzorku můžeme pozorovat pouze původní rozpadlé austenitické zrno. Současné zrno nám zakrývají karbidy, které jsou rozsety po celé matici oceli. Celková mikrostruktura je středně hrubá, což odpovídá podle normy ČSN EN ISO 643 rozmezí stupnice 6 až 7. Struktura oceli obsahuje hodně nečistot a vměstků, což můžeme také pozorovat na obrázcích.

Nyní můžeme s jistotou říct, že mikrostruktura oceli z formy vyrobené v Číně je zcela odlišná od mikrostruktury oceli z formy vyrobené v Německu. Obě mikrostruktury se od sebe liší hlavně ve velikosti zrna. Dalšími rozdíly jsou způsoby tepelného zpracování, chemické složení oceli, čistota oceli, tvar a velikost karbidů obsažených v matici.

### 5.3.3 Vyhodnocení tvrdosti vzorků

Zkouškou tvrdosti zjistíme, jakou odolnost má materiál také vůči otěru, opotřebení. Pro zkoušku tvrdosti podle Vickerse byl z každé formy odebrán jeden zkušební vzorek a následně provedeno jeho změření. Výsledné data jednotlivých zkoušek byly zapsány do tabulky 5 a 6. Hodnoty tvrdosti podle Vickerse byly přepočteny na hodnotu tvrdosti podle Rockwella pomocí převodních tabulek.

Z tabulek jednotlivých měření si můžeme povšimnout rozdílně naměřených hodnot tvrdosti vzorku. Je to způsobeno tím, že materiál formy vyrobené v Německu byl nejspíš tepelně zpracován odlišnou technologií než materiál formy vyrobené v Číně. Hodnoty naměřené u materiálu v tabulce 5 se také mírně liší mezi jednotlivým měřením. Může to být způsobeno nepřesným postupem měření nebo nestejnorodou strukturou materiálu.

Tabulka 5: Hodnoty tvrdosti vzorku oceli z formy vyrobené v Číně.

	1. měření	2. měření	3. měření
Úhlopříčka 1 [ $\mu\text{m}$ ]	407	406	412
Úhlopříčka 2 [ $\mu\text{m}$ ]	411	406	416
Aritmetický průměr úhlopříčky [ $\mu\text{m}$ ]	409	406	414
HV30	332	337	324
HRC	33	34	32

Tabulka 6: Hodnoty tvrdosti vzorku oceli z formy vyrobené v Německu.

	1. měření	2. měření	3. měření
Úhlopříčka 1 [ $\mu\text{m}$ ]	445	449	444
Úhlopříčka 2 [ $\mu\text{m}$ ]	441	444	448
Aritmetický průměr úhlopříčky [ $\mu\text{m}$ ]	443	447	446
HV30	283	278	281
HRC	27	26	26

V tabulce 6 jsou zapsány hodnoty tvrdosti z měření vzorků Německé formy, která má menší opotřebení a také se u této formy vyskytuje minimum poruch než u formy, která je vyrobená v Číně (tabulka 5).

#### 5.3.4 Vyhodnocení vrubové houževnatosti vzorku

Zkouškou vrubové houževnatosti zjistíme jakou má materiál odolnost dynamickému porušení za nízkých nebo vysokých teplot. Při zkoušení vrubové houževnatosti v tomto případě byla okolní teplota a teplota vzorku  $20^{\circ}\text{C}$ . Vzorky byly odebrány z každé formy po dvou kusech a označeny pro formu vyrobenou v Číně 1C a 2C a pro formu vyrobenou v Německu 1N a 2N. Rozměry vzorku byly zhotoveny podle normy ČSN EN 10 045 pro V vrub. Velikost V vrubu pro vlastní zkoušku byla 2mm.

V tabulce 7 můžeme vidět mírné odchylky zapsaných hodnot změřené vrubové houževnatosti z formy vyrobené v Číně a z formy vyrobené v Německu. Vzorek 1C a 2C má menší vrubovou houževnatost než vzorek 1N a 2N. S jistotou můžeme říct, že materiál formy vyrobené v Německu bude mít lepší houževnatost než materiál formy vyrobené v Číně. V druhém sloupci jsou zapsané hodnoty vrubové houževnatosti, které byly vypočítány pomocí rovnice (1).

Tabulka 7: Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti.

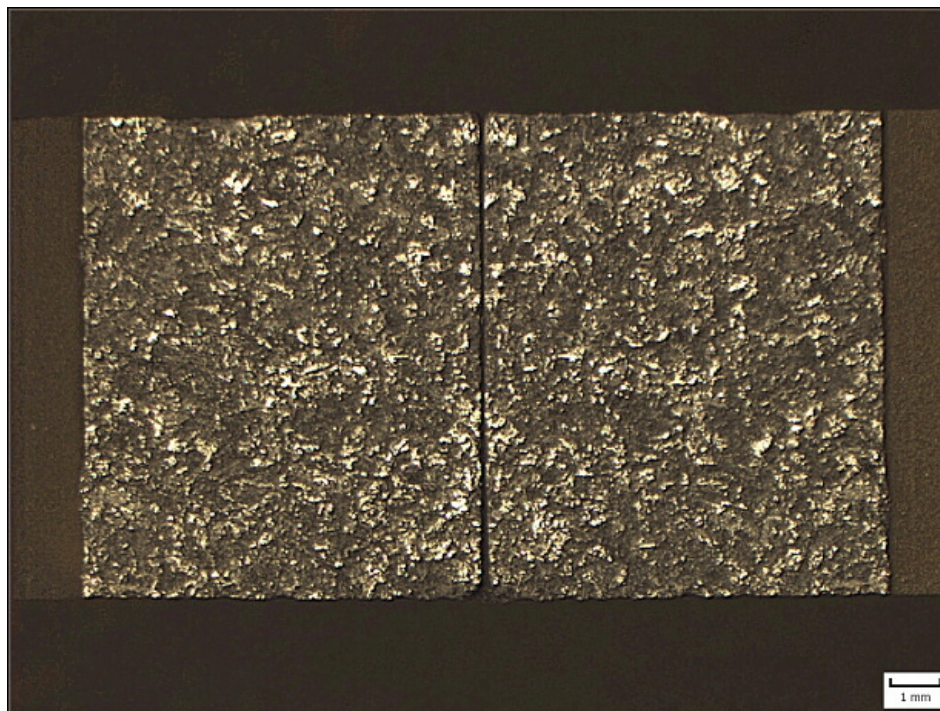
Vzorek a číslo měření	K [J]	KCV [ $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ ]
Vzorek 1C	6,4	8,0
Vzorek 2C	8,9	11,1
Vzorek 1N	11,0	13,8
Vzorek 2N	9,7	12,2

Pokud stanovíme určitý technologický postup pro zvýšení houževnatosti u formy vyrobené v Číně, musí být po vykonání tohoto procesu hodnota vrubové houževnatosti větší nebo shodná s hodnotou jakou má forma vyrobená v Německu. V případě, že by tato podmínka nebyla dodržena, může opět docházet k lámání pracovní části formy.

### 5.3.5 Makroskopická analýza lomu

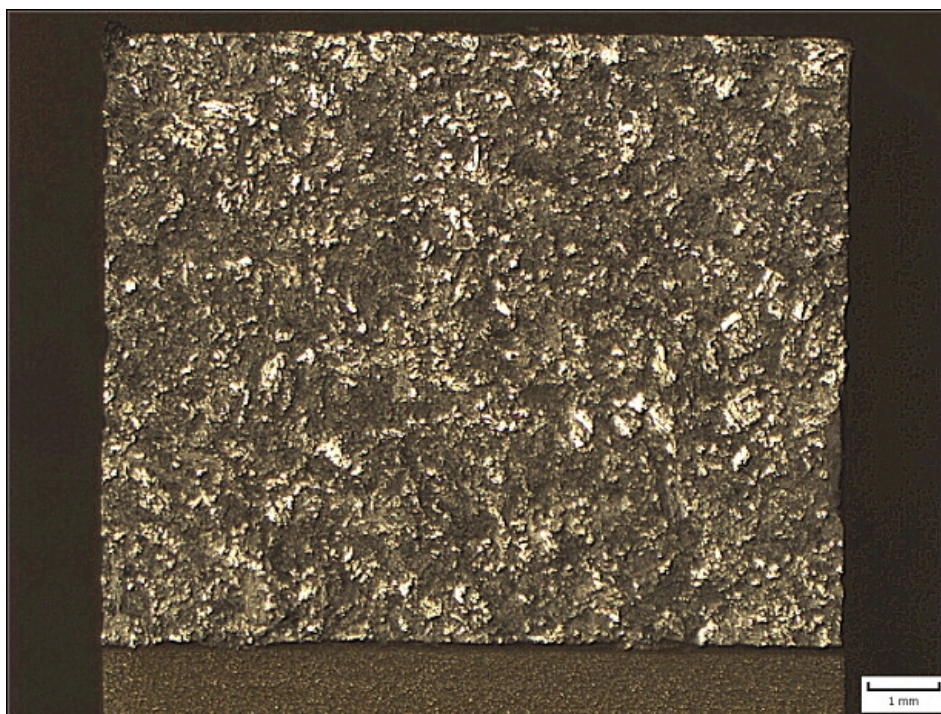
Pro vyhodnocení makroskopické analýzy jsme získali lom z provedené zkoušky vrubové houževnatosti. Lom byl proveden na Charpyho kladivu za teploty zkušebního vzorku 20°C. Po vykonání zkoušky vrubové houževnatosti byl lom vzorku následně prozkoumán pomocí stereomikroskopu. Hodnocení a dokumentace lomu byla provedena pomocí mikroskopu s 5x a 90x optickým zvětšením. Nyní prozkoumáme a porovnáme jednotlivé lomy vzorků mezi sebou.

Na obrázku 21 můžeme pozorovat lom ocelového vzorku odebraného z formy vyrobené v Číně. Vzhled lomu je zde velice hrubý. Jde o křehký transkrystalický lom, kdy došlo k porušení vzorku přes hranice zrna. Podle struktury lomu jde nejspíše o tzv. naftalínový lom [16], který se obvykle vyskytuje u nástrojových ocelí. Vznik tohoto druhu lomu je podmíněn hrubozrnnou mikrostrukturou oceli a vyskytuje se převážně u bainitické nebo martenzitické struktury.

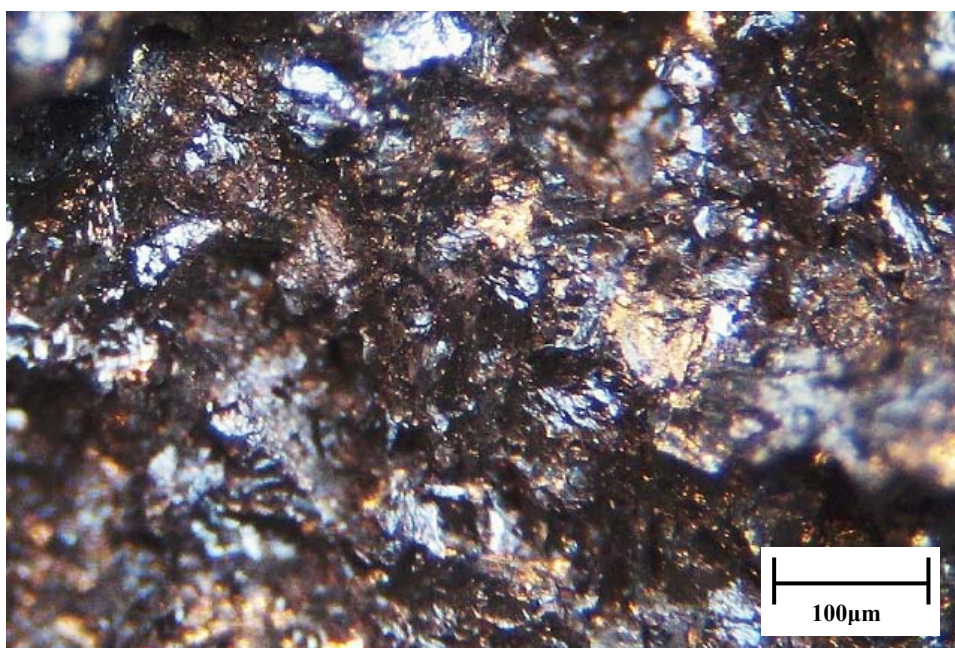


a) zvětšení 5x





b) zvětšení 5x

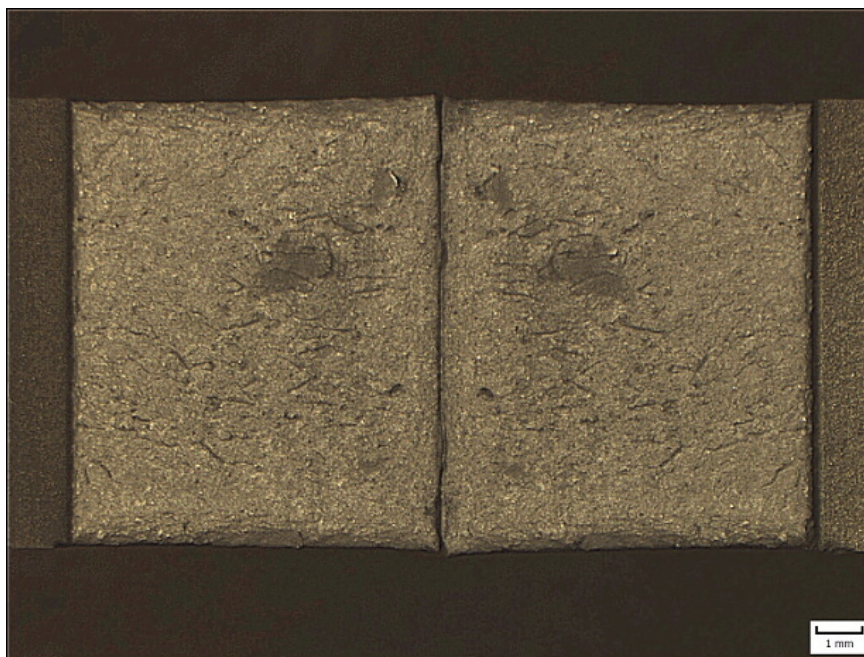


c) zvětšení 90x

Obr. 21: Makroskopická analýza lomu oceli z formy vyrobené v Číně.



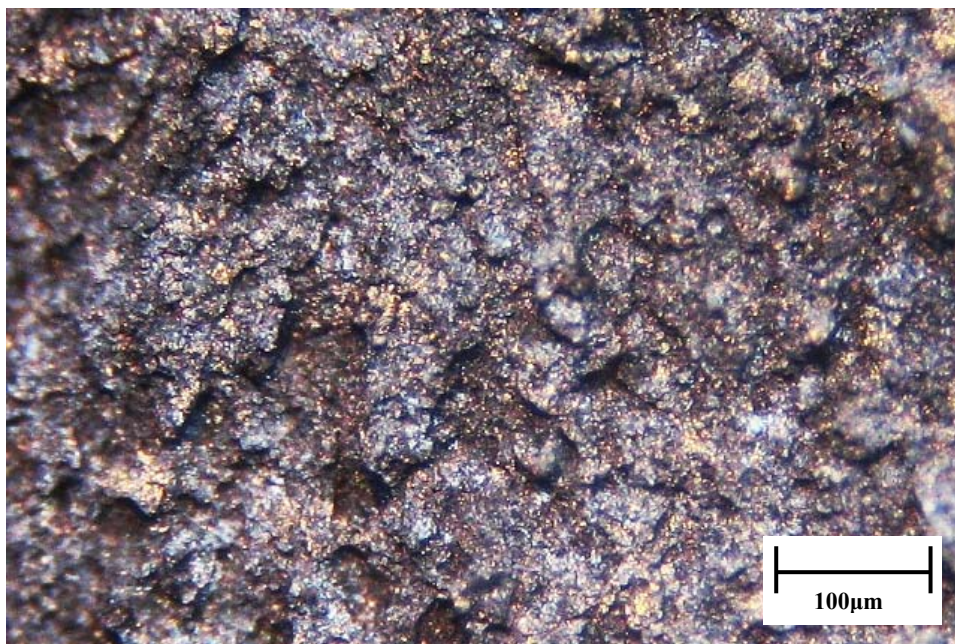
Na obrázku 22 vidíme zobrazení lomu ocelového vzorku, který byl odebrán z formy vyrobené v Německu. Vzhled lomu je jemný s úzkou šikmou plochou na okraji vzorku, která vznikla smykovým porušením při samotné zkoušce. Tato plocha se může vyskytovat u materiálu, které mají mírně zvýšenou houževnatost. U tohoto vzorku jde opět o křehký transkrystalický lom [16], kdy k porušení vzorku došlo přes hranice zrna.



a) zvětšení 5x



b) zvětšení 5x



c) zvětšení 90x

Obr. 22: Makroskopická analýza lomu z formy vyrobené v Německu.

Z obou lomů vzorků vrubové houževnatosti vidíme, že oceli jednotlivých forem jsou od sebe výrazně odlišné. U vzorku z formy vyrobené v Číně můžeme pozorovat hrubý transkrystalický lom, čemuž odpovídá i mikrostruktura oceli. Vzorek z formy vyrobené v Německu má křehké porušení, ale na okraji vzorku se objevují fazety vyjadřující lom s lepší houževnatostí.

## 6 DISKUZE DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

V této kapitole se budeme zabývat analýzou experimentálních dat a srovnáním naměřených hodnot. Dále bude navrženo tepelné zpracování materiálu, který byl použitý v Číně na výrobu formy, aby se zvýšily jeho vlastnosti na potřebnou úroveň. Po vykonání stanoveného technologického postupu tepelného zpracování musí být dosaženo zvýšení vlastností materiálu formy vyrobené v Číně alespoň na úroveň, jakou má materiál formy vyrobené v Německu.

- Z chemické analýzy vzorku odebraného z formy vyrobené v Číně bylo zjištěno, že podle normy EN ISO 4957 je nejbližší podobná nástrojová ocel s označením 40CrMnMo8-6. Jedná se o chrom-mangan-molybdenovou ocel, která se využívá při výrobě forem na zpracování plastů.

U vzorku odebraných z formy, která byla vyrobena v Německu, bylo zjištěno, že podle normy EN ISO 4957 je nejbližší shodná nástrojová ocel s označením X38CrMo16. V praxi se označuje jako chrom-molybdenová (martenzitická) ocel, která se používá při výrobě forem pro zpracování chemicky abrazivních hmot.

- Při metalografické analýze byly zkoumány vzorky odebrané z obou druhů forem. U formy vyrobené v Číně byla zjištěna bainitická struktura s vysokým obsahem karbidů chromu a molybdenu. Mikrostruktura oceli je velice hrubá s nerovnoměrnými zrny. Ve struktuře oceli můžeme vidět původní austenitická zrna, které jsou středních rozměrů, ale také současná velmi hrubá zrna. Celková velikost zrn mikrostruktury podle ČSN EN ISO 643 odpovídá rozmezí stupnice 2 až 3.

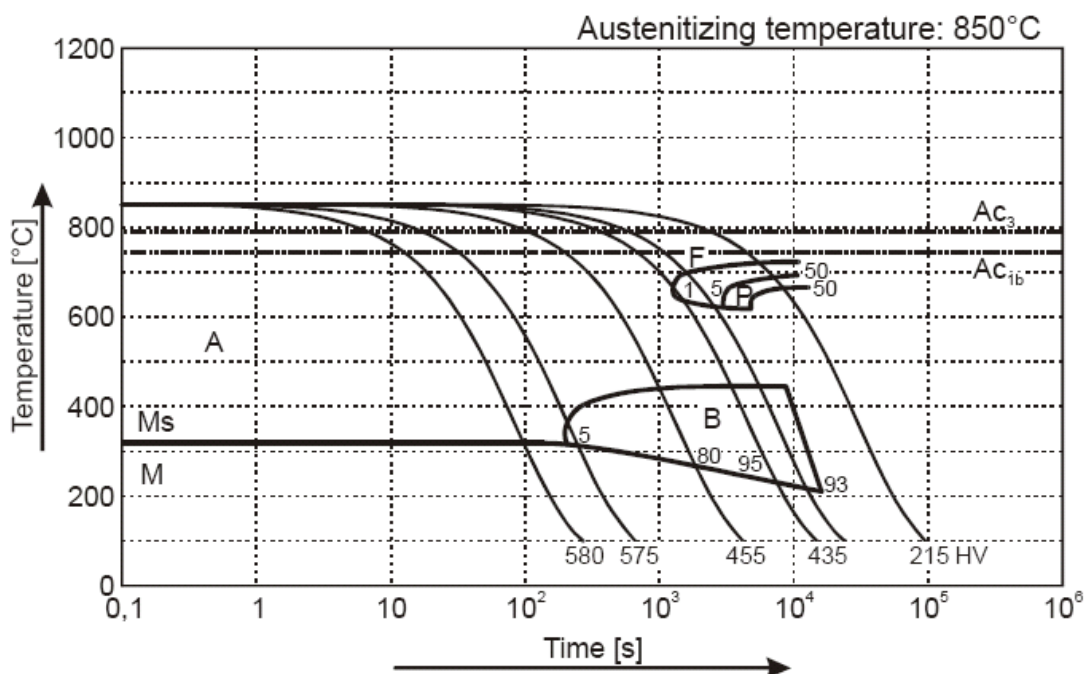
U vzorku z formy vyrobené v Německu byla zjištěna bainitická struktura s velkým množstvím karbidů ve formě řádků a sítí. Velikost zrna této struktury je špatně určitá, neboť zrna jsou překryta velkým množstvím karbidů chromu. Z obrázku lze pouze slabě vidět původní austenitická zrna, která dosahují střední velikosti. Celková velikost zrn mikrostruktury je středně hrubá, což odpovídá podle normy ČSN EN ISO 643 rozmezí stupnice 6 až 7.

- Pro určení hodnoty tvrdosti oceli se odebraly vzorky z obou forem. U formy vyrobené v Číně byla naměřená průměrná výsledná tvrdost materiálu HV331. Hodnota tvrdosti na vzorcích z formy vyrobené v Německu byla o něco nižší HV280.



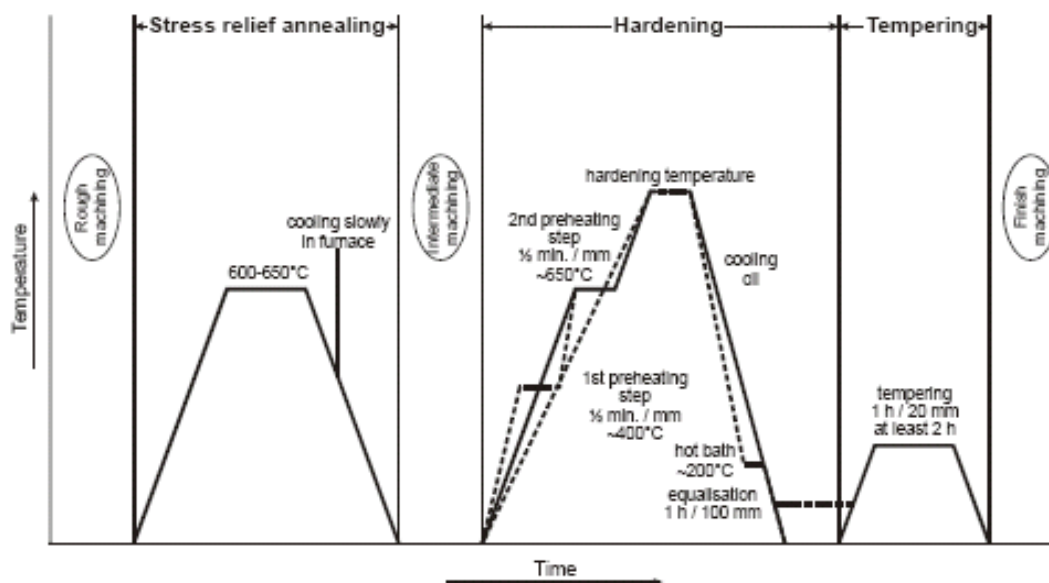
Tvrдость materiálu z formy vyrobené v Číně je zbytečně vysoká a tím i houževnatost je nižší. Pokud chceme docílit stejné tvrdosti a houževnatosti oceli, jako je na materiálu formy vyrobené v Německu, musíme materiál tepelně zpracovat. K tomuto procesu nám pomůžou diagramy tepelného zpracování obr. 21 až 23.

Pro zvýšení integrity materiálu formy vyrobené v Číně musíme provést následující operace. Nejdříve je potřeba materiál formy ohřát na teplotu austenitizace 850°C obr. 21. Ohřátí oceli musíme provést ve dvou etapách dle obr. 22 (kalení), aby nedošlo k jeho deformaci. Následně provedeme ochlazení materiálu tak, abychom dosáhli bainitické struktury o tvrdosti HV280. Materiál formy ochlazujeme o něco pomaleji, než je charakter křivky 5 (čteno z levé strany) na obr. 21.



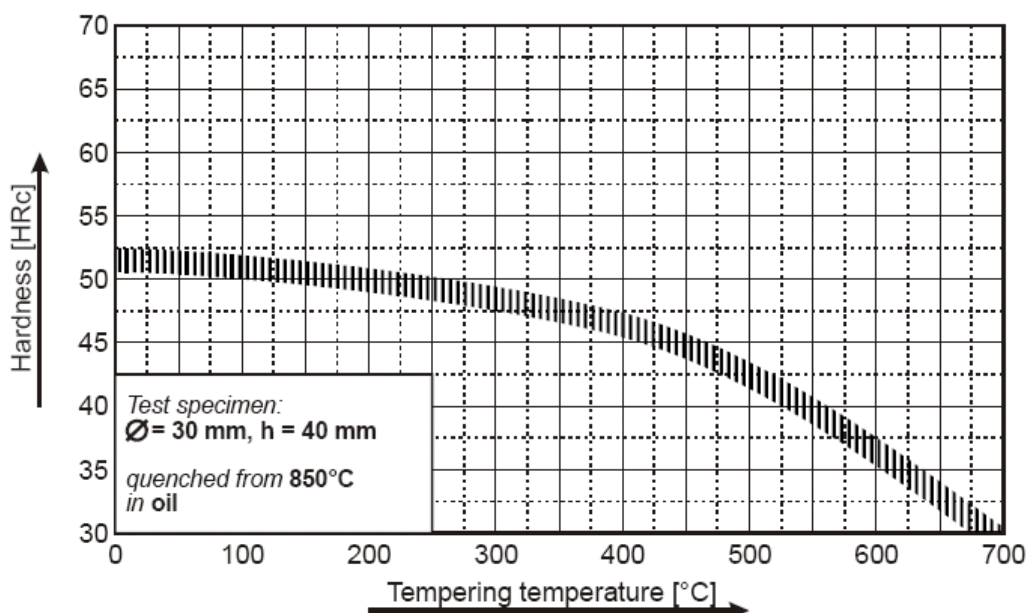
Obr. 21: Diagram ARA pro nástrojovou ocel 40CrMnMo8-6 [1].

- Jako další alternativní možnost zvýšení vlastností ocelí můžeme použít proces kalení s následným popouštěním. Při kalení musíme materiál formy vyrobené v Číně opět ohřát na teplotu austenitizace 850°C ve dvou etapách obr. 22 (kalení), aby nedošlo k jeho deformaci. Po dovršení teploty austenitizace setrváme na této teplotě až do prohřátí celého průřezu materiálu a poté provedeme okamžité ochlazení výrobku do oleje. Ochlazujeme buď do oleje o teplotě 200°C a po dovršení této teploty v celém průřezu necháme výrobek volně vychladnout na teplotu 20°C rychlostí 1h/100mm, nebo můžeme materiál ochladit v oleji přímo na okolní teplotu 20°C obr. 22 (kalení).



Obr. 22: Diagram tepelného zpracování oceli 40CrMnMo8-6 [1].

Pokud budeme při kalení provádět ochlazení na teplotu 20°C, musíme provést popouštění. Teplotu popouštění pro tuto ocel jsme stanovili z popouštěcího diagramu obr. 23 a z požadované konečné tvrdosti materiálu (HRC30). Popouštění provedeme opětovným ohřevem materiálu na popouštěcí teplotu 700°C. Po dovršení popouštěcí teploty setrváme na této teplotě cca 1h. 20min. až 2h obr. 22 (popouštění). Následně provedeme pozvolné ochlazení materiálu na vzduchu o teplotě 20°C.



Obr. 23: Popouštěcí diagram oceli X38CrMo16 [1].

Při tepelném zpracování oceli vyrobené v Číně, musíme dbát na to, abychom docílili správné rychlosti ochlazení materiálu, a nesmíme dopustit zhrubnutí zrna. V případě, že by došlo ke zhrubnutí zrna, měl by materiál sice požadovanou tvrdost, ale špatnou houževnatost. Celkové tepelné zpracování bude závislé na zkušenostech a dovednostech pracovníků, kteří budou zpracování provádět. Konečným výsledkem obou způsobů tepelného zpracování musí být výsledná tvrdost materiálu HV280.

- Ze zkoušky vrubové houževnatosti bylo zjištěno, že výsledné hodnoty vzorků odebrané z formy vyrobené v Číně byly o něco nižší, než výsledné hodnoty vzorků odebrané z formy vyrobené v Německu. Hodnota nárazové práce vzorku odebraného z formy vyrobené v Číně byla 6,4J a 8,9J, kdežto hodnota nárazové práce u formy vyrobené v Německu dosahovala 11,0J a 9,7J.
- Z makroskopické analýzy lomu po zkoušce vrubové houževnatosti bylo na vzorcích oceli z formy vyrobené v Číně nalezeno hrubé krystalické porušení. Přesněji řečeno, jedná se o transkrystalický křehký lom (pravděpodobně naftalínový). Vzhled lomu je nerovnoměrný s hrubou strukturou.

Vzorky, které byly odebrané z formy vyrobené v Německu, vykazovaly také křehké porušení, ale s mírně zvýšenou houževnatostí. Vyšší houževnatost byla prokázána jak numericky, tak i na lomu, kdy se na okrajích vzorku objevovaly úzké šikmé plošky. Vzhled lomu je rovný s jemnou strukturou.

- Navrhovaný technologický postup tepelného zpracování plyne z experimentálních výsledků a poznatků, které byly zjištěny a také z dat uvedených od výrobce oceli. Z těchto výsledků také vyplývá, že oceli navržené od jednotlivých výrobců jsou zcela odlišné. Tyto odlišnosti mohou mít vliv na konečné vlastnosti materiálu a také na časté opotřebení formy. Chrom obsažený ve vzorcích z Německé formy může mít velký vliv na mechanické i metalurgické vlastnosti pracovní části formy. Z těchto důvodů se doporučuje vyrobit nová forma stejným způsobem, jak byla vyrobena forma v Německu. U této formy je totiž opotřebení pracovních částí menší a jsou zde prokazatelně lepší výsledky zkoušek na houževnatost a také odolnost vůči chemickým vlivům.

## 7 ZÁVĚR

V teoretické části byly vysvětleny jednotlivé požadavky, které jsou kladeny na oceli při výrobě forem zpracovávající výrobky z pryže. Byly zde vysvětleny transformace, které probíhají při přeměně oceli a také popsány jednotlivé zkoušky materiálu. V experimentální části se provedly jednotlivé analýzy vzorků odebraných z forem vyrobených v Číně a Německu.

V kapitole druhy a vlastností oceli na výrobu forem byly vysvětleny podmínky, které jsou kladeny na materiál při výrobě forem. V této kapitole bylo provedeno rozdělení jednotlivých ocelí, které se používají při výrobě forem, které zpracovávají pryž. Vlastnosti ocelí závisí na okolnostech, za kterých se bude forma používat a jaké nároky budou na formu kladeny.

Dále byly vylíčeny jednotlivé druhy transformací, které vznikají při tepelném zpracování ocelí na výrobu forem. Bylo zjištěno, že se jedná o jeden z nejdůležitějších procesů při výrobě forem, kde tepelné zpracování a následné přeměny má velký vliv na konečné vlastnosti výrobku. Dále byly vysvětleny diagramy ARA, které jsou nedílnou součástí při tepelném zpracování oceli.

V části zkušebních metod ocelí byly popsány druhy mechanických zkoušek, které se používají při zkoušení mechanických vlastností oceli pro výrobu uvedených forem. Zvolení vhodné zkušební metody závisí na prostředí, ve kterém bude výrobek použit, ale také na namáhání které bude na něj kladeno.

V experimentální části bylo provedeno několik analýz vzorků neznámých značek ocelí odebraných z forem, které se používají při výrobě pryže. Jeden vzorek byl odebrán z formy vyrobené v Německu a druhý vzorek byl odebrán z formy vyrobené v Číně. Z výsledných hodnot obou ocelí bylo zjištěno, že se jedná o nástrojovou ocel, která se používá při výrobě forem zpracovávající elastomery.

Z naměřených hodnot vzorků odebraných z formy vyrobené v Německu bylo zjištěno, že podle normy EN ISO 4957 je nejblíže příbuzná nástrojová ocel s označením X38CrMo16. Z výsledků odebraných z formy vyrobené v Číně bylo shledáno, že podle normy EN ISO 4957 je nejblíže podobná nástrojová ocel s označením 40CrMnMo8-6. Obě tyto oceli se používají při výrobě forem, ale s rozdílem, že ocel s označením X38CrMo16 má zvýšený

obsah chromu. Tato ocel se používá při výrobě forem, na kterých se zpracovávají elastomery s vyšším obsahem abrazivních látek. Dále byly zjištěny rozdíly ve výsledné tvrdosti a houževnatosti vzorků odebraných z forem.

V konečné fázi byl proveden návrh tepelného zpracování na zvýšení odolnosti a životnosti formy vyrobené v Číně. Doporučené postupy tepelného zpracování byly stanoveny podle provedených zkoušek, výsledků a dat pořízených od výrobce oceli. V konečné části byla doporučena výroba nových forem z oceli, která byla odebrána a zjištěna z formy vyrobené v Německu. Důvodem tohoto návrhu je rozdílné chemického složení oceli, tepelné zpracování, tvrdost a vrubová houževnatost.

Z této práce můžeme stanovit, že návrh vhodného materiálu je základem pro bezporuchovost a dlouhodobou životnost výrobku. Je pravdou, že produkty vyrobené na zakázku u firem s všeobecným zaměřením výroby jsou cenově výhodnější než produkty vyrobené u kmenových výrobců. Kmenové firmy však mají dlouholetou zkušenost a prověřenou technologii výroby, kdežto firmy s všeobecným zaměřením vyrábějí tyto výrobky prvně a bez prověřené technologie. Následně pak dochází k poddimenzování výrobku, nebo materiál výrobku je špatně navržen.

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ABRAMS, J. *Data sheets 40CrMnMoS8-6*: [online]. Poslední revize 2009-01 [cit.2010-05-02]. Dostupné z: <http://www.premium-stahl.de/P20%2BS.pdf>.
- [2] ABRAMS, J. *Data sheets X38CrMo16*: [online]. Poslední revize 2009-01 [cit.2010-05-02]. Dostupné z: <http://www.premium-stahl.de/1.2316engl.pdf>.
- [3] Autorský kolektiv Poldi Kladno. *Nástrojové oceli a jejich použití I. Díl*. Praha: SNTL, 1986. 412 s.
- [4] Autorský kolektiv Poldi Kladno. *Nástrojové oceli a jejich použití II. Díl*. Praha: SNTL, 1986. 224 s.
- [5] BHADESHIA, H.K.D.H., HONEYCOMBE, R.W.K. *Steels: microstructure and properties*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 344s. ISBN 0-7506-8084-9.
- [6] BROOKS, CH.R. *Principles of the Austenitization of steels*. London: Elsevier science publishers, 1992. 217 s. ISBN 1-85166-770-9
- [7] ČÍŽEK, L. *Praktikum ze zkoušení kovů I*. 2.vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1990, s. 26-42
- [8] ČSN EN 10045-1 (420381). *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu podle Charpyho - Část 1: Zkušební metoda (V a U vruby)*. Praha: Český normalizační institut, 1998. 12 s.
- [9] ČSN EN ISO 642 (420447). *Ocel - Čelní zkouška prokalitelnosti (zkouška podle Jominyho)*. Praha: Český normalizační institut, 2001. 24 s.
- [10] ČSN EN ISO 643 (420462). *Ocel - Mikrografické stanovení velikosti zrn*. Praha: Český normalizační institut, 2003. 40 s.
- [11] ČSN EN ISO 6507-1 (420374). *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 24 s.
- [12] FREMUNT, P., KREJČÍK, J., PODRÁBSKÝ, T. *Nástrojové oceli* Brno: Dům techniky, 1994. 229 s.
- [13] FÜRBACHER, J., MACEK, K., STEIDL, J., a kol. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty*. Praha: Dashöfer, c1998-2006. ISBN-80-86229-02-5

- [14] JURČI, P. *Kovové materiály*. 1.vyd. Praha: ČVUT, 2006. 164 s. ISBN 80-01-03513-3. Kapitola 5, Nástrojové materiály, s. 63–107.
- [15] KLIKA, Z. *Vybrané kapitoly z předmětu nauka o materiálu II*. 1.vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1985, s. 39-64.
- [16] KOUTSKÝ, J., JANDOŠ, F., KAREL, V. *Lomy ocelových částí*. Praha: SNTL, 1976, s. 150-279.
- [17] LOBER, D. *Informations about steel for metallographer*: [online]. Poslední revize 2007-11 [cit.2008-05-20]. Dostupné: <<http://www.metallograf.de/start-eng.htm>>.
- [18] MACHEK, V., SODOMKA, J. *Nauka o materiálu: kovy a kovové materiály 2. část*. Praha: ČVUT, 2002. 213 s. ISBN 80-01-02568-3.
- [19] MOLLIKOVÁ, E. *Zjišťování struktury materiálů*: [online]. Poslední revize 2006-11-20 [cit.2010-05-02]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijni%20opory/zmv/ZJISTOVANI%20STRUKTURY%20MATERIALU.doc>.
- [20] MOLLIKOVÁ, E. *Zkouška rázem v ohybu*: [online]. Poslední revize 2006-11-20 [cit.2010-05-02]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/Studijniopory/zmv/ZKOUSKA RAZEM V OHYBU.doc>.
- [21] PLUHAŘ, J., BENEŠ, V. *Konstrukční a nástrojové materiály*. Praha: České vysoké učení technické, 1982, s. 104-119.
- [22] PŘIBIL, E. *Materiálový list 40CrMnMoS8-6*: [online]. 2007 [cit.2010-05-02]. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojovky/NOPLASTY/materiallovelisty/40crMnMoS86/>.
- [23] PŘIBIL, E. *Materiálový list X38CrMo16*: [online]. 2007 [cit.2010-05-02]. Dostupné z: <http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/nastrojovky/NOPLASTY/materiallovelisty/X38CrMo16/>.
- [24] PTÁČEK, L., a kol. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3.
- [25] SAMUEL, M. A., EDWIN, L. T. *The structure of materials*. New York: Wiley-Academy, 1999. 447s. ISBN 0-471-00082-5

- [26] SILBERNAGEL, A. *Nauka o materiálu I*. 2.vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1985. 331s.
- [27] SZOSTOK, M. *Diagnostika nástrojových ocelí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Katedra materiálového inženýrství, 2008. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Stanislav Lasek, Ph.D.
- [28] VELES, P. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. 2.vyd. Bratislava: ALFA, 1989, 408s.